

Teräsputkisillat

SUUNNITTELUOHJE

25.2.2014



Teräspankksillat

Suunnitteluohje

25.2.2014

Liikenneviraston ohjeita 10/2014

Liikennevirasto

Helsinki 2014

Kannen kuva: Jouko Selkämä

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-255-428-4

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Infra ja ympäristö

Vastaanottaja
ELY-keskusten Liikenne- ja infrastruktuuri – vastuualueet,
Liikenneviraston Toiminnan ohjaus, Hankkeet ja Väylänpito -toimialat
Konsultit

Säädösperusta
Maantielaki 109 §

Korvaa
Teräspankiskillat, suunnitteluohje, 2.2.2012, Liikenneviraston ohjeita 2/2012

Kohdistuvuus
Liikennevirasto

Voimassa
1.3.2014 alkaen toistaiseksi

Asiasanat
Ohjeet, sillansuunnittelu, putkisillat, taitorakenteet

Teräspankiskillat, suunnitteluohje

Ohjetta sovelletaan eurokoodijärjestelmässä, joka on otettu käyttöön Liikenneviraston väylähankkeiden suunnittelussa 1.6.2010 alkaen. Suunnitteluohjeessa esitetään putkisilltojen toimivuusvaatimukset, uudistuneet suunnitteluperusteet ja suunnitteluohjeet.

Tämä ohje korvaa aikaisemman 2.2.2012 päivätyn teräspankiskilltojen suunnitteluohjeen (Liikenneviraston ohjeita 2/2012). Ohjeeseen on tehty muutamia tarkennuksia ja pieniä korjauksia. Muutokset ja tarkistukset on lueteltu tämän ohjeen esipuheessa.

Ylijohtaja


Raimo Tapio

Tekninen johtaja


Markku Nummelin

LISÄTIETOJA
Jani Meriläinen
Liikennevirasto
puh. 0295 34 3571

Esipuhe

Tässä ohjeessa esitetään yleiset laatuvaatimukset ja ohjeet aallotettujen teräsputkisilltojen suunnittelua varten. Ohje on laadittu huomioiden eurokoodit, niiden siltoja koskevat kansalliset liitteet ja soveltamisohjeet.

Ohjeen 2.2.2012 päivätyn version laatimista on ohjannut asiantuntijaryhmä, jonka jäseninä ovat olleet:

- tieinsinööri Markku Nousiainen, Liikenneviraston taitorakenneyksikkö
- dipl.ins. Jani Meriläinen, Liikenneviraston taitorakenneyksikkö
- dipl.ins. Heikki Lilja, Liikenneviraston taitorakenneyksikkö
- dipl.ins. Ilkka Sinisalo, VR Track Oy, Liikenneviraston edustajana
- dipl.ins. Risto Parkkila, VR Track Oy, Liikenneviraston edustajana
- osastopäällikkö Jouko Selkämä, Rumtec Oy ja Oy ViaPipe Ab
- toimitusjohtaja Olli Böök, Kaitos Oy
- dipl.ins. Perttu Juntunen, Kaitos Oy
- toimitusjohtaja Juhani Günther, Miranet Oy
- myyntipäällikkö, Timo Palo, Miranet Oy.

Ohjeen 2.2.2014 päivätty versio on laadittu Destian Infrasuunnittelu-yksikössä, jossa työhön ovat osallistuneet tekn. lis. Torsten Lunabba, dipl.ins. Panu Tolla, dipl.ins. Antti Jussila ja dipl.ins. Kimmo Julku.

Tässä ohjeen 25.2.2014 päivityssä versiossa oleelliset suunnittelua koskevat muutokset edelliseen versioon verrattuna ovat:

- Pulttien laskentaa tarkennettu:
 - Käytettävät pultit eivät ole kartiopultteja, joten vetolujuuden kerroin $k_2 = 0,9$.
 - Väljien pultinreikien alennuskerroin 0,85 on muutettu koskemaan vain kitkavoimaa.
 - Pulttien kitkavoimasta poistettu liukumiskestävyys pienennys.
 - Kitkavoiman kitkakerroin muutettu murtorajatilassa samaksi kuin väsytyksessä ($\mu = 0,3 \rightarrow 0,4$).
 - On lisätty kaava pulttien esijännitysvoimaa vastaavalle kiristysvääntömomentille.
- Väsytyksimitoituksessa jännitysvaihteluvälin laskennassa huomioidaan puristava voima.
- Vierekkäisten putkien vähimmäisetäisyyksiä on muutettu.
- Pulttien reikävähennyksen huomioiminen profiilin lujuudessa on poistettu.
- On lisätty vaatimus alikulkukäytävien vajovesisuojuuksesta.
- On lisätty kappale suunnitelmassa esitettävistä asioista.
- Liitteen mitoitus esimerkki on päivitetty.

Lisäksi muihin kohtiin on tehty pienenhöjä muutoksia ja tarkistuksia.

Ohje on notifioitu Euroopan unionin komissiossa (2012/48/FIN).

Ohjeen päivitys on laadittu Liikenneviraston tilaamana konsulttityönä Insinööritoimisto Suunnittelukide Oy:ssä. Ohjeen päivitykseen ovat osallistuneet seuraavat henkilöt:

- dipl.ins. Tomi Harju, Liikennevirasto
- dipl.ins. Heikki Lilja, Liikennevirasto
- dipl.ins. Jani Meriläinen, Liikennevirasto
- dipl.ins. Panu Tolla, Liikennevirasto
- dipl.ins. Ilkka Sinisalo, VR Track Oy
- osastopäällikkö Jouko Selkämä, Rumtec Oy
- dipl.ins. Kimmo Julku, Destia Oy
- dipl.ins. Jarmo Niemi, Insinööritoimisto Suunnittelukide Oy
- ins. AMK Ville Vuorio, Insinööritoimisto Suunnittelukide Oy

Helsingissä helmikuussa 2014

Liikennevirasto
Täitorakenneyksikkö

Sisällysluettelo

1	YLEISTÄ	8
1.1	Ohjeen tarkoitus ja soveltamisalue	8
1.2	Määritelmät	9
2	SUUNNITTELUN PERUSTEET	11
2.1	Perusvaatimukset	11
2.2	Ulkonäkö ja sopivuus ympäristöön	11
2.3	Liikenne ja vedenkulku	11
2.4	Rakenteen käyttöikä	11
2.5	Rakenteen kantavuusvaatimukset	12
2.6	Teräspankityypit	12
2.6.1	Putken muoto	12
2.6.2	Putken rakenne	15
2.7	Putken valinta	15
2.7.1	Käyttötarkoitus	16
2.7.2	Hydraulinen mitoitus	16
2.7.3	Pohjasuhteet	17
2.8	Materiaalivaatimukset	17
2.8.1	Betoni	17
2.8.2	Levymateriaali ja ruuvit	17
2.8.3	Metalliset pinnoitteet	17
2.8.4	Ei-metalliset pinnoitteet	18
2.8.5	Täytöt	19
2.8.6	Sallitut mittapoikkeamat	20
2.9	Ympäristönsuojelulliset näkökohdat	21
3	MITOITUS	22
3.1	Poikkileikkausarvot	22
3.2	Staatitset kuormat	23
3.2.1	Pysyvät kuormat	23
3.2.2	Tiesillat	23
3.2.3	Rautatiesillat	25
3.2.4	Kevyen liikenteen sillat	26
3.2.5	Ekvivalentti viivakuorma	26
3.3	Väsyttävät kuormat	28
3.3.1	Tiesillat	28
3.3.2	Rautatiesillat	28
3.4	Osavarmuusluvut	28
3.5	Voimasuureet	30
3.5.1	Ruotsalainen mitoitusohje	30
3.5.2	FEM 30	
3.5.3	Normaalivoima	31
3.5.4	Momentti	31
3.6	Geotekniikka	31
3.7	Putki	31
3.7.1	Staatitinen mitoitus	31
3.7.2	Tiesillan taipuma	33
3.7.3	Rautatiesillan taipuma	33
3.8	Pulttiliitos	33

3.9	Laen ja nurkkien vahvistaminen	37
3.10	Putken väsymiskestävyys	40
3.10.1	Yleistä	40
3.10.2	Tiesillat	41
3.10.3	Rautatiesillat	46
3.11	Liitosten väsymiskestävyys	46
3.11.1	Yleistä	46
3.11.2	Tiesillat	47
3.11.3	Rautatiesillat	48
3.12	Käyttöikämitoitus	48
3.12.1	Yleistä	48
3.12.2	Veden laadun vaikutus	48
3.12.3	Olosuhdeluokat	48
3.12.4	Teräspanutken käyttöikään vaikuttavat tekijät	50
3.12.5	Lisäsuojaus	51
3.12.6	Yksinkertaistettu käyttöikämitoitus	52
4	MUU SUUNNITTELU	54
4.1	Putken viiste ja suuntakulma	54
4.2	Putken pituus	55
4.3	Vierekkäiset putket	57
4.4	Perustaminen	57
4.4.1	Yleistä.	57
4.4.2	Sillan painuma	58
4.4.3	Teräsholvisillan perustukset	59
4.4.4	Perustamistavat	61
4.5	Siirtymäkiila	61
4.6	Verhoukset ja eroosiosuojaus	61
4.7	Tukimuurit	62
4.8	Kuivatus	62
4.9	Valaistusrakennukset ja kiinnikkeet	62
4.10	Tarkkailutapit	62
4.11	Alikulkukäytävän päädyn suojaus	63
4.12	Kaiteet	63
4.13	Aukko tien keski- tai välialueella	63
4.14	Maadoitus	64
4.15	Suunnitelmassa esitettäviä asioita	64

LIITTEET

Liite 1	Aallotettujen teräspanutkien perustietoja
Liite 2	Perustamistapojen ohjeelliset mallikuvat
Liite 3	Mitoitusesimerkki

1 Yleistä

1.1 Ohjeen tarkoitus ja soveltamisalue

Aallotettuja teräspankia käytetään tie- ja ratarakenteissa siltoina ja rumpuina.

Tässä asiakirjassa esitetään ohjeet ja yleiset laatuvaatimukset vapaa-aukoltaan vähintään 2-metrinen aallotettujen teräspankisiltojen suunnittelua varten eurokoodien mukaisesti. Rautatiesiltana toimivan teräspankisillan jännemitta saa olla enintään 8 metriä.

Teräspankisillan rakentamista varten on aina tehtävä mitoituskalkelmat ja laadittava rakennussuunnitelma. Kalkelmat toimitetaan tilaajalle rakennussuunnitelman mukana.

Ohje ei suoraan sovellu rumpuputkien, olemassa olevien siltojen sujutuskorjaamisen eikä tunkkaamalla tai poraamalla tehtävien teräspankisiltojen suunnitteluun. Näihin tapauksiin liittyvät suunnittelukysymykset suositellaan käsiteltäväksi tapauskohtaisesti. Tapauskohtaisesti ratkaistavia asioita ovat mm. ympäristäytön maaparametrit, olemassa olevien rakenteiden vaikutus teräspankisillan toimintaan ja maan tiivistettyyteen. Olemassa olevien teräspankisiltojen sujuttamista, puolipohjausta ja ruis-kubetonointia on käsitelty SILKO-ohjeessa 2.341.

Ohjeita ja laatuvaatimuksia putken rakentamista varten on esitetty Liikenneviraston ohjeessa *Teräspankisillat, rakentamisen laatuvaatimukset /26/*.

1.2 Määritelmät

Aallotettu teräspanutki

Vesistöissä ja alikulkukäytävänä käytettävä putkirakenne, joka on valmistettu aallotetusta teräslevystä tai teräsnauhasta.

Aallotus

Teräslevyn tai -nauhan aaltomainen muoto. Aallotus ilmoitetaan profiilin aallon pituutena ja korkeutena.

Alempi väsymisraja

Jännitysraja, jonka alapuolella rakenne kestää äärettömän määrän kuormitusyklejä (SFS-EN 1993-1-9)

Box culvert

Teräsholvisilta, jossa laakean kaaren alimmat osat ovat suoria.

Ekvivalentti viivakuorma p_{traffic}

Laskennallinen tietä vasten kohtisuorassa oleva viivakuorma [kN/m].

FEM (Finite Element Method)

Elementtimenetelmä. Numeerinen ratkaisumenetelmä, jossa ratkaistava tehtävä jaetaan rajalliseen määrään elementtejä.

Jännemitta

Teräspanutkisillan jännemitta D on suurin mahdollinen vaakamitta putken seinien neutraaliakseleiden välillä.

Kierresaumattu putki

Putkirakenne, joka on valmistettu teräsnauhasta joko saumaamalla tai hitsaamalla.

Käyttöikä

Ajanjakso, jonka ajan rakenteen ominaisuudet säilyvät rakenteelta vaadittavalla tasolla.

Monilevyrakenne

Putkirakenne, joka on valmistettu aallotetuista teräslevyistä kokoamalla.

Olosuhdeluokka

Putken eri osat luokitellaan käyttöolosuhteiden perusteella olosuhdeluokkiin 1–4.

Peitesyvyys

Putkisillan laen yläpinnan pienin pystysuora etäisyys ylittävän tien pinnasta tai radan kv:stä.

Putkisilta

Maahan upotettu aallotettu teräspanutki tai holvi, joka toimii yhteisvaikutuksessa maan kanssa siltana. Putkisillan jännemitta on vähintään 2 metriä.

Putken taivutusmomentti

Positiivisella taivutusmomentilla tarkoitetaan taivutusmomenttia, joka venyttää profiilin putken sisäpuoleisia huippuja. Negatiivinen taivutusmomentti venyttää putken ulkopuolisia huippuja.

Redusoitu peitesyvyys

Peitesyvyys redusoidaan putkisillan mitoitus varten huomioimalla täyttötyöstä johtuva teräsputken laen nousu.

Siltapaikkaluokitus

Luokitus, jonka tarkoituksena on tuottaa siltapaikalle estetiikaltaan ja arkkitehtuuriltaan siltapaikan kriteerien perusteella sopivia ja riittävän tasokkaita siltoja. Siltapaikkaluokkien kriteereinä ovat siltapaikan sijainti, kulttuuriarvo ja maisema-arvo.

Suuntakulma

Väylän keskilinjaa ja putken keskilinjaa välinen kulma väylien keskilinjasta myötäpäivään mitattuna.

Teräsholvisilta

Teräsholvisilta on rakenne, jossa teräskaari lepää erillisten perustusten päällä. Teräsholvi luetaan teräsputkisillaksi erilaisesta rakenteestaan huolimatta.

Toteutusluokka

Luokiteltu kokoelma toteutukselle eriteltyjä vaatimuksia, jotka voivat koskea koko rakennustyötä tai yksittäistä kokoonpanoa. Teräsputkisillat kuuluvat toteutusluokkaan 3.

Vakioamplitudinen väsymisraja

Jännitysvaihtelun raja-arvo, jonka alapuolella ei esiinny väsymisvaurioita vakioamplitudisella jännitysvaihtelulla. Vaihtuva amplitudisessa jännitysvaihtelussa kaikkien jännitysvaihteluiden pitää alittaa tämä raja, että väsymisvaurioita ei esiinny (SFS-EN 1993-1-9).

Viiste

Putken pään kalteva osa, joka on usein tieluiskan kaltevuudessa.

Väsymisluokka

Rakenneyksityiskohdan annettu kestävyysluku, joka vastaa kahden miljoonan jännityssyklin kestävä jännityksen vaihteluväliä (SFS-EN 1993-1-9).

Yhteisvaikutuskerroin

Kerroin jolla huomioidaan normaalivoiman ja taivutusmomentin samanaikainen vaikutus.

2 Suunnittelun perusteet

2.1 Perusvaatimukset

Teräsputkisiltojen suunnittelu tehdään standardien EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993 ja EN 1997, niiden kansallisten liitteiden ja soveltamisohjeiden (NCCI) sekä tämän ohjeen mukaan.

Teräsputkisillat katsotaan kuuluvan seuraamusluokkaan CC2. Pienet, halkaisijaltaan 2 metriset, teiden putkisillat kuuluvat kuitenkin seuraamusluokkaan CC1 mahdollisen rakenteen vaurioitumisen vähäisten seuraamusten takia.

2.2 Ulkonäkö ja sopivuus ympäristöön

Teräsputkisillan soveltuvuus on arvioitava siltapaikkakohtaisesti ja suunnittelun perusteeksi on määritettävä ympäristöön sopivuuden asettamat vaatimukset aukon koolle ja muodolle, rakennetyypille, pintakäsittelylle ja putken päiden verhoukselle. Teräsputkisillan ja siltapaikan on täytettävä Liikenneviraston määräämät siltojen ulkonäköä ja siltapaikkojen viimeistelyä koskevat vaatimukset. Vaatimukset määräytyvät tilaajan asettaman siltapaikkaluokan mukaan.

2.3 Liikenne ja vedenkulku

Rakenteen on täytettävä asetetut aukkovaatimukset ja mahdollistettava veden esteetön virtaus putken läpi. Aukkovaatimuksesta on hankittava alueellisen Ely-keskuksen lausunto lupapäätöksen tarpeesta ja aukon vähimmäiskoosta. Lausunnon perusteella hankkeelle on haettava aluehallintoviraston vesitalouslupa ja kiireellisissä tapauksissa töiden aloittamislupa.

2.4 Rakenteen käyttöikä

Liikenneviraston siltojen ylläpidon toimintalinjojen mukaan teiden teräsputkisiltojen normaali suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta ja rautatiesiltojen 100 vuotta. Jos putkisilta sijaitsee vilkasliikenteisen tien (kvl > 3000 ajon./vrk.) alla tai peitesyvyys on yli 3 metriä, niin myös tien putkisillan suunnittelukäyttöikä on 100 vuotta.

Suunnittelukäyttöiän saavuttamisen edellytyksenä on sillan kantavien päärakennosien laatuvaatimusten mukainen rakentaminen sekä hyvällä hoidolla ja ylläpidolla varmistettu säilyvyys. Muita rakennenosia voidaan korjata ja uusia useitakin kertoja.

Suunnittelukäyttöikä olosuhdeluokan ohella vaikuttaa putken suojausmenetelmän määrittämiseen. Suunnittelukäyttöikä on aina ilmoitettava suunnitelmassa.

Jos tavoiteltu suunnittelukäyttöikä ei ole käyttöikämitoituksen perusteella saavutettavissa, aukkomittoihin on lisättävä vähintään 200 mm, jotta sujutusmenetelmän käyttö olisi tarvittaessa mahdollinen korjausmenetelmä tulevaisuudessa. Sujutettava putkisilta on mitoitettava aina vähintään 50 vuoden käyttöiälle ja sujutusmahdollisuudesta on mainittava suunnitelmissa.

2.5 Rakenteen kantavuusvaatimukset

Tiessä tai radassa olevan rakenteen on kestävä siihen kohdistuvat kuormat, jotka ovat Liikenneviraston määäämät tie-, rautatieliikenteen tai kevyen liikenteen sillan kuormat sekä muut siltoihin kohdistuvat kuormat eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/* mukaan niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1991-2 /3/ ja sen kansallisen liitteen vaatimukset. Rakenteella ja sen perustuksilla tulee olla riittävä varmuus murtoon nähden eri murtotavat huomioon ottaen eikä niihin saa syntyä haitallisia muodonmuutoksia.

Sillan suunnittelija määää sillan sallitun painuman ja painumaeron eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 /10/* mukaisesti niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/ ja sen kansallisen liitteen (LVM) vaatimukset. Sillan perustaminen suunnitellaan siten, että tämä vaatimus täyttyy. Rakenteen mitoitus tehdään luvussa 4 esitetyillä menetelmillä.

2.6 Teräsputkityypit

2.6.1 Putken muoto

Aallotetut teräsputket jaetaan muodoltaan seuraaviin ryhmiin:

- pyöreä
- matalarakenteinen
- alikulkukäytävätyyppi
- elliptinen ja vaakaelliptinen
- teräsholvi.

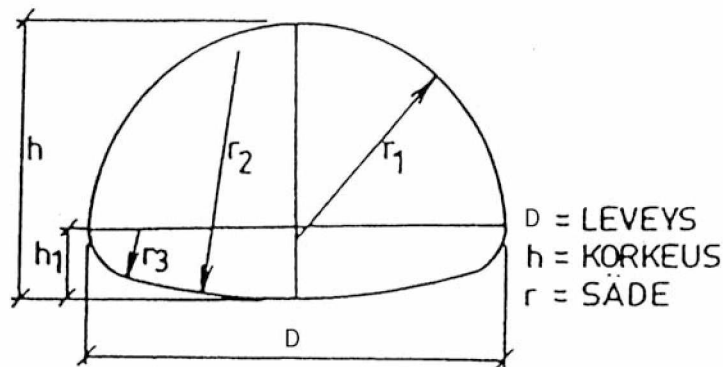
Mainittuja putkityyppejä käytetään sekä vesistösiltoina että alikulkukäytävinä. Putken muoto on harkittava kussakin tapauksessa erikseen paikalliset olosuhteet ja erityisnäkökohdat huomioon ottaen. Teräsholvisilta luetaan putkisillaksi erilaisesta rakenteestaan huolimatta.

Pyöreä putki soveltuu rautatiesiltoihin, vesistösiltoihin sekä ulkoilua tai maataloutta palveleviin alikulkukäytäviin.

Matalarakenteinen putki soveltuu alikulkukäytäviin sekä matalan penkereen alla oleviin vesistösiltoihin. Matalarakenteinen putki voi tietyllä vesisyvyydellä johtaa jopa 50 % enemmän vettä kuin samalle syvyydelle perustettu korkeudeltaan yhtä suuri pyöreä putki.

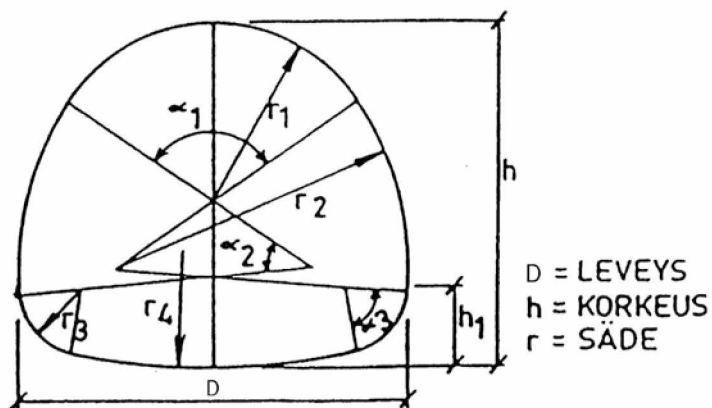
Matalarakenteisen putken käyttöä rajoittaa putken alanurkkien kohdalle syntyvä suuri pohjarasitus, mikä asettaa erityisiä vaatimuksia pohjamaan kantavuudelle. Matalarakenteinen putken sijasta voidaan käyttää esimerkiksi vierekkäisiä pyöreitä putkia.

Matalarakenteisia putkia on useita tyyppieä, joissa alanurkan kaarevuussäde on erilainen.



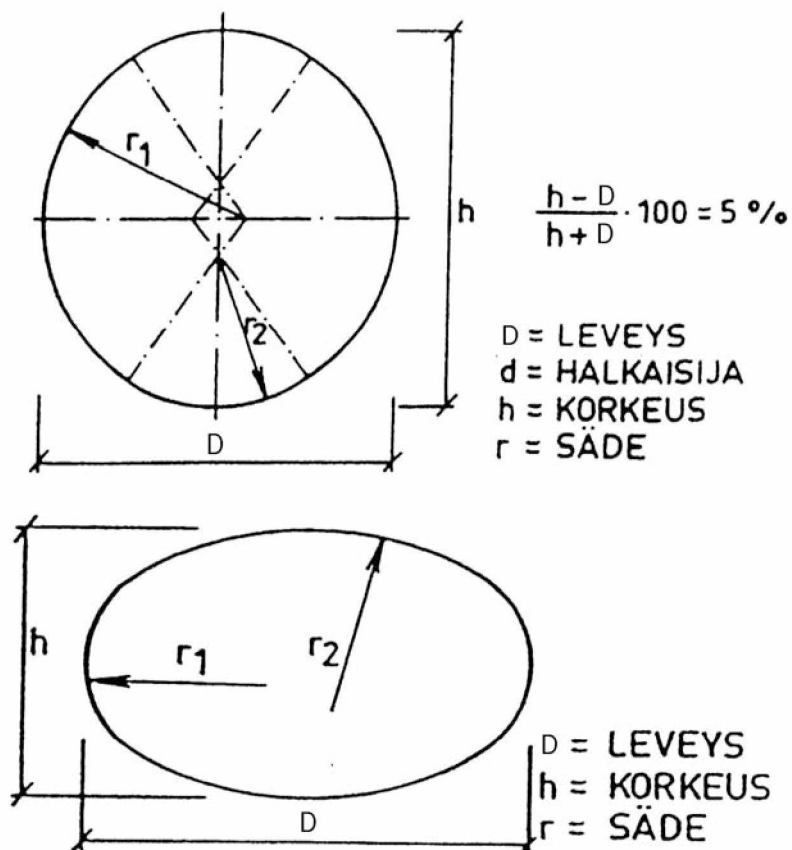
Kuva 2.1. Matalarakenteisen putken poikkileikkaus.

Alikulkukäytävätyyppejä käytetään nimensä mukaisesti pääasiassa alikulkukäytävänä. Suurta alikulkukorkeutta tarvittaessa alikulkukäytävä- ja elliptinen muoto ovat toistensa vaihtoehtoja.



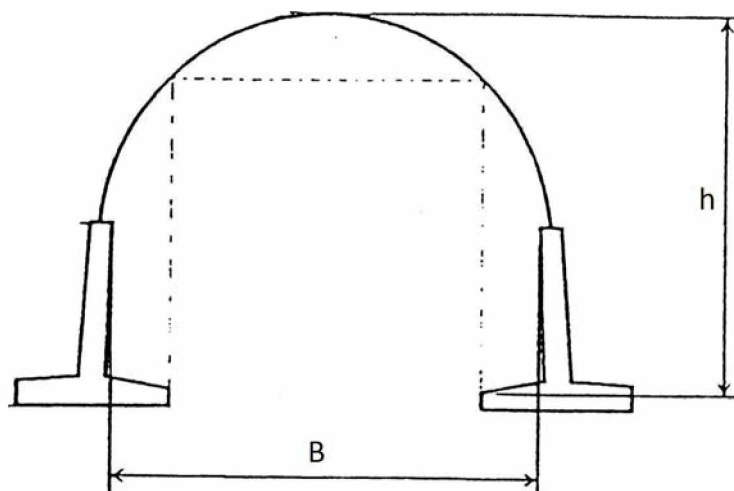
Kuva 2.2. Alikulkukäytävätyypin putken poikkileikkaus.

Elliptinen putki (elliptisyys pystysuunnassa 5 %) on vaihtoehtoinen rakenne pyöreälle putkelle tai alikulkukäytävätyypille. **Vaakaelliptinen** putki (elliptisyys vaakasuunnassa 15 %) soveltuu käytettäväksi matalarakenteisen putken vaihtoehtona.



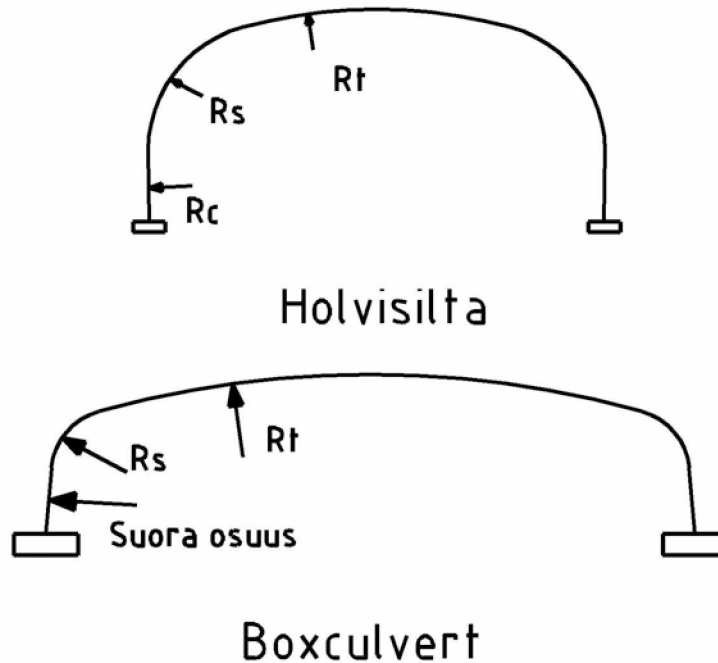
Kuva 2.3. Elliptisen ja vaakaelliptisen putken poikkileikkaus.

Teräsholvisilta on rakenne, jossa teräskaari lepää erillisten perustusten päällä. Sen pääasiallisia käyttökohteita ovat kantavalle perusmaalle rakennettavat alikulkukäytävät, alikäytävät ja vesistösillat. Vesistösillan uoma säilyy tällöin maapohjaisena.



Kuva 2.4. Betonijalkaisen teräsholvisillan poikkileikkaus.

Box culvert on teräsholvisilta, jossa kaaren alimmat osat ovat suorja. Kehämallinen box culvert silta on holvisillan tapaan alikulkukäytävän tapainen silta, mutta se soveltuu myös risteys­siltoihin.



Kuva 2.5. Useampisäteinen teräsholvisilta ja box culvert silta /2/.

2.6.2 Putken rakenne

Teräspankksillat jaetaan rakenteeltaan seuraaviin ryhmiin:

- Monilevy rakenne. Putkirakenne, joka on valmistettu aallotetuista teräslevyistä kokoamalla.
- Kierresaumattu rakenne. Putkirakenne, joka on valmistettu teräsnauhasta joko saumaamalla tai hitsaamalla.

2.7 Putken valinta

Putken koon, muodon ja rakennetyypin valinta tehdään rakennuspaikan olosuhteiden ja rakenteellisen mitoituksen perusteella vaihtoehtoja vertailemalla. Vertailussa otetaan huomioon mm. seuraavat tekijät:

- käyttötarkoitus
- ulkonäkö
- hydraulinen mitoitus
- pengerkorkeus
- pohjaolosuhteet
- veden ja maan laatu
- kustannukset

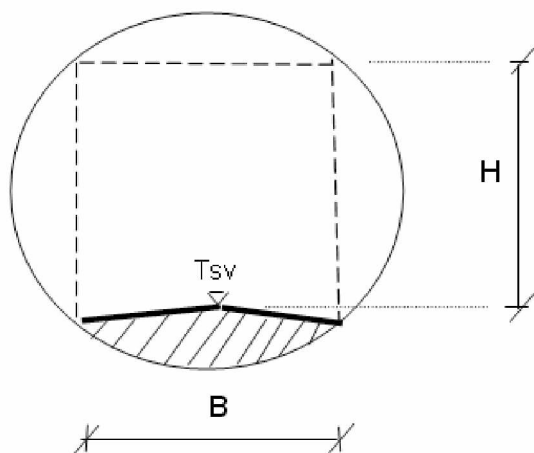
2.7.1 Käyttötarkoitus

Vesistösilan tyyppi valitaan lähinnä vaaditun aukon koon ja kunnossapitönäkökohtien perusteella. Käyttötarkoituksen kannalta tyylin valintaan vaikuttava tekijä on veneliikenne.

Alikulkukäytävän tyylin valintaan käyttötarkoituksen kannalta vaikuttavia tekijöitä ovat liikenne, maatalous ja ulkoilu. Aukon koko mitoitetaan alikulkevan liikenteen ja kunnossapitokaluston vaatiman tilan mukaan.

Liikenteen vaatiman aukon mitat määritetään yleensä tien rakennussuunnitelmassa. Jos aukkovaatimusta ei ole annettu, alikulkukäytävien suorakaiteenmuotoisen vapaan liikennetilan leveyden ja korkeuden vähimmäismitat ovat (kuva 2.6):

- Koneellisesti kunnossapidettävissä alikulkukäytävissä
 - leveys $B \geq 3,5 \text{ m}$
 - korkeus $H \geq 3,0 \text{ m}$.
- Luontopoluilla ja eläinten kulkua varten rakennettavissa tunneleissa, joissa ei ole koneellista kunnossapitoa
 - leveys $B \geq 2,0 \text{ m}$
 - korkeus $H \geq 2,5 \text{ m}$.



Kuva 2.6. Alikulkukäytävän vapaan liikennetilan vähimmäismitat.

Kun teräspankikisilta toimii risteyssiltana, vapaan liikennetilan korkeuteen on lisättävä 0,5 metrin törmäysriskivara.

Sillan rakennussuunnitelmassa on aina esitettävä vaaditut liikennetekniset mitat, joita rakennustyössä ei saa alittaa.

2.7.2 Hydraulinen mitoititus

Vesistösilan aukkovaatimus määritetään yleensä Ely-keskuksen lausunnossa, jolloin hydraulista mitoitusta ei tarvitse tehdä. Tarvittaessa hydraulinen mitoititus vesiaukon koon ja putken pohjan korkeusaseman määrittämiseksi voidaan tehdä Liikenneviraston julkaisun *Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu* mukaisesti /24/.

Putken aukon kokoa ja muotoa määritettäessä otetaan vaihtoehtoina huomioon erimuotoiset yksittäiset putket sekä myös mahdollisuus käyttää kahta tai useampaa

putkea rinnakkain. Kaksoisputken tai useampienkin putkien käyttö voi tulla kyseen, jos virtaama on suuri ja korkeutta on vähän käytettävissä. Putket voivat olla myös erikokoisia.

2.7.3 Pohjasuhteet

Sillan pohjasuhteet selvitetään ohjeen Sillan geotekninen suunnittelu /35/ mukaan, niin että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/ ja sen kansallisen liitteen (LVM) sekä eurokoodin soveltamisohjeessa *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7* /10/ esitetyt vaatimukset. Osana pohjatutkimuksia selvitetään pohjamaan ja veden korroosioolosuhteet.

Vaihtelevissa pohjaolosuhteissa on yleensä tarkoituksenmukaista selvittää pohjasuhteet siltapaikan alueella sellaisessa laajuudessa, että silta voidaan sijoittaa mahdollisimman edulliseen paikkaan.

2.8 Materiaalivaatimukset

2.8.1 Betoni

Teräsholvin anturoissa käytetään säilyvyyden varmistamiseksi siltabetonia, jonka lujuusluokka ja pakkasenkestävyysvaatimus määritetään eurokoodin soveltamisohjeessa *Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2* /9/ mukaisesti ottaen huomioon sillan taivoteikäyttöikä.

2.8.2 Levymateriaali ja ruuvit

Monilevyrakenteen levymateriaalin tulee täyttää vähintään standardin SFS-EN 10025 *Kuumavalssatut rakenneteräkset* luokan S235 JR vaatimukset /17/.

Kierresaumatun rakenteen levymateriaalin tulee täyttää standardin SFS-EN 10346 *Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot.* /15/

Ruuvien myötölujuuden (R_{el}) on oltava vähintään 320 MPa. Ruuvityypin on oltava putken toimittajan hyväksymä.

Teräksen myötöraja ja vetomurtolujuus määräytyy eurokoodien SFS-EN 1993-1-1 /4/ mukaan. Levyteräksen kestävyys mitoitusarvot saadaan jakamalla myötöraja f_y taulukon 3.2 mukaisella varmuuskertoimella γ_{Mo} . Kun kierresaumattuja putkiprofiileja tehdään kylmämuokkaamalla matalarakenteisiksi putkisilloiksi, teräksen myötöraja on jaettava ylimääräisellä varmuuskertoimella $\gamma_{Mored} = 1,15$.

2.8.3 Metalliset pinnoitteet

Monilevyrakenteen kuumasinkityksen tulee täyttää standardin SFS-EN ISO 1461 *Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet. Spesifikaatiot ja testausmenetelmät* /30/. Standardissa määritellään keskimääräinen kerrospaksuus ja paikallinen vähimmäispaksuus. Vähimmäisvaatimukset sinkkikerroksen paksuudelle ovat taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1 Monilevyrakenteen kuumasinkkipinnoitteen vähimmäispaksuuden vaatimukset.

Teräksen ainevahvuus (t_y)	Keskimääräinen kerrospaksuus (minimi) [μm]	Paikallinen kerrospaksuus (minimi) [μm]
$t > 6 \text{ mm}$	85	70
$3 < t \leq 6 \text{ mm}$	70	55
$1,5 \leq t \leq 3 \text{ mm}$	55	45

Kierresaumatun rakenteen kuumasinkityksen tulee täyttää standardin SFS-EN 10346 *Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot /15/*. Standardi koskee sekä sinkki- että alusinkkituotteita.

Standardeissa määritellään pinnoitteen massa molempien puolien yhteenlaskettuna arvona. Massan perusteella on taulukkoon 2.2 laskettu pinnoitteen paksuuden keskiarvo ja yhden mittausalueen vähimmäisarvo.

Taulukko 2.2. Sinkityksen paksuuden määrittäminen kierresaumatulle rakenteelle.

Sinkitys	Massa [g/m^2] (molemmat puolet yhteensä)		Paksuus [μm]	
	Kolmen kokeen keskiarvo	Yhden kokeen arvo	Molempien puolien keskiarvo	Yhden mittausalueen vähimmäisarvo
Kuumasinkitys Z600	600	510	42	32
Kuumasinkitys Z840	840	714	60	46
Kuumasinkitys Z1000	1000	850	70	53
Kuumasinkitys Z1200	1200	1020	85	65

Pinnoitteet Z1000 ja Z1200 eivät vielä sisälly edellä mainittuihin jatkuvatoimisen kuumaupotusmenetelmän standardeihin. Niiden todentaminen tapahtuu kappale-tavarastandardin SFS-EN ISO 1461 /30/ mukaan.

Sinkityksen paksuus ja lisäsuojauksen tarve määritetään käyttöikämitoituksessa.

Ruuvien ja muttereiden tulee olla kuumasinkittyjä ja sinkkikerroksen paksuuden 45 μm . Ruuvien väljyys on valittava siten, ettei sen sinkitys vaurioidu kiristettäessä.

2.8.4 Ei-metalliset pinnoitteet

Ei-metallisia pinnoitteita ovat maalit sekä polymeeripinnoitteet, kuten epoksi, polyuretaani tai polyeteeni. Nämä pinnoitteet ovat sinkityn teräspinnan lisäsuojausmenetelmiä.

Ei-metallisten pinnoitteiden osalta noudatetaan seuraavia standardeja:

- SFS-EN ISO 12944-1...8 *Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.* /18/
- SFS-EN 10169. Orgaanisilla aineilla pinnoitetut (muovipinnoitetut) ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot /19/
- ASTM A742M Specification for Steel Sheet, Metallic-coated, and Polymer Precoated for Corrugated Steel Pipe /22/

2.8.5 Täytöt

Alus- ja ympäristäytömmateriaalin tulee täyttää julkaisussa InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 1 Väylät ja alueet /12/ esitetty jakavan tai kantavan kerroksen materiaalin laatuvaatimukset eikä se saa sisältää läpimitaltaan yli 63 mm kiviä. Jos ympäristäytöjen mitat eivät täytä em. ohjeen vaatimuksia, voidaan tilaajan suostumuksella käyttää pienempiä arvoja. Pienempien ympäristäytöjen toteuttaminen vaatii yleensä erityisratkaisuja, kuten esimerkiksi betonointia.

Suunnittelija määrittää sillan rakennussuunnitelmassa sekä alus- että ympäristäytölle tiiviysvaatimuksen kuivairtoilavuuspainona, joka voi olla joko 92 % tai 95 % parannetulla proctorkokeella määritetystä maksimi kuivairtoilavuuspainosta.

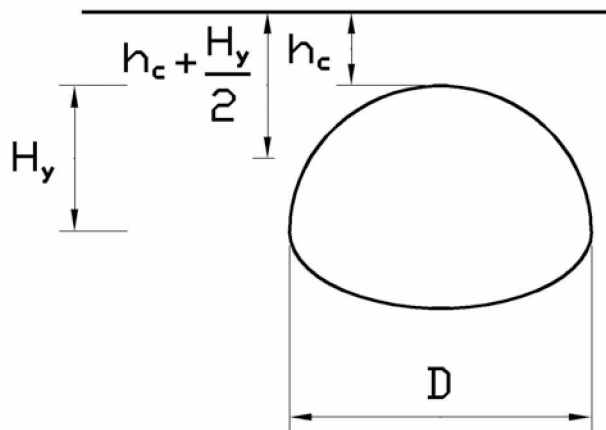
Teräsputkisillan alus- ja ympäristäytön maaparametreina mitoituksessa käytetään taulukossa 2.3 ja kuvassa 2.8 esitettyjä arvoja, kun alus- ja ympäristäytöt täyttävät teräsputkisilltojen rakentamisen laatuvaatimuksissa /26/ esitetty materiaali- ja tiiviysvaatimukset. Taulukon 2.3 maaparametrien arvot ovat mitoitusarvoja ja tarkoitettu vain putkisillan mitoitusta varten eikä niitä voi käyttää laatuvaatimuksina rakentamisessa. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti.

Taulukko 2.3 Alus- ja ympäristäytön maaparametrit.

	Kantavan tai jakavan kerroksen materiaali (murske Gp 0/63)	Jakavan kerroksen materiaali (luonnonsora)
Tangenttimoduuli [MPa] kun $h_c + H_y/2 = 1$ m	48	38
Tangenttimoduuli [MPa] kun $h_c + H_y/2 = 10$ m	65	55
Sisäinen kitkakulma $\phi_k (^\circ)$	45	40
Tilavuuspaino γ [kN/m ³]	21	20
h_c on täyttösyvyys [m] H_y on putken yläosan korkeus [m], mitataan putken uloimmista pisteistä putken lakipisteeseen.		

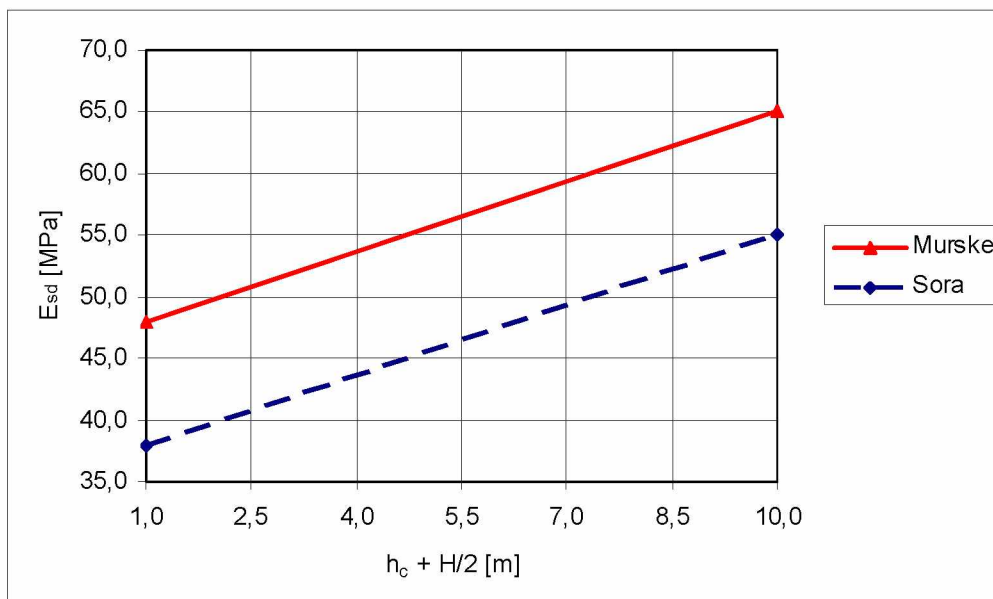
Suunnittelijan tulee ilmoittaa käytettävät täyttömaalajit yleispiirustuksessa. Mikäli maalajit rakennustyön aikana muutetaan, asia käsitellään suunnitelmanmuutoksena.

Putkisillan teräsrakenteen väsymismitoitusta tehtäessä tangenttimoduuleja voidaan korottaa 10 %.



Kuva 2.7 Maamoduulin tarkastelusyvyys.

Mikäli rakentamistyössä ei saavuteta alus- ja ympäristäytölle vaatimukseksi asetettua tiivysastetta 95 % parannetulla proctor-kokeella määritetystä maksimi kuivairtoilavuuspainosta, on taulukossa 2.3 tai kuvassa 2.8 esitettyjä moduuliarvoja redusoitava. Mikäli saavutettu tiivysaste on 92 %, kerrotaan moduuliarvot kertoimella 0,65. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. 92 % huonompaa tiivysastetta ei hyväksytä.



Kuva 2.8 Maamoduuli eri syvyyksillä (95 % parannettu Proctor)

2.8.6 Sallitut mittapoikkeamat

Putken suunnittelumitoissa tulee ottaa huomioon rakentamista koskevat valmiin rakenteen laatuvaatimukset ja toleranssit /26/, erityisesti seuraavat putken lopulliseen valintaan liittyvät vaatimukset: Sillan vapaa-aukon sallittu poikkeama sillan rakennussuunnitelmassa esitetystä mitasta on $\pm 2,5$ % ja putken korkeuden ± 2 % vapaa-aukon mitasta laskettuna. Rakennussuunnitelmassa esitetty liikennetekniset mitat ja peitesyvyyden vähimmäisarvo (tiesilloissa 500 mm, rautatiesilloissa 1400 mm) eivät saa alittua.

Suunnitelmissa on esitettävä aukon vapaan sisätilan mitat tai kuvan Kuva 2.6. Alikulkukäytävän vapaan liikennetilan vähimmäismitat. mukaiset aukon liikennetekniset mitat, joita ei saa alittaa. Rakennussuunnitelma on päivitettävä vapaa-aukon ja korkeuden mittojen osalta, kun lopullinen putkityyppi on valittu.

Ilman uutta mitoitusputken korkeus- ja/tai leveysmittoja saa muuttaa korkeintaan $0,01 \cdot D$, kuitenkin enintään 50 mm ja vain siten, että muotopoikkeama säilyy em. suuruisena ja kaikkialla samansuuntaisena poikkileikkauksen kaikissa osissa. Putken teräsmateriaalin lujuutta tai aallotetun levyn jäykkyyttä, taivutusvastusta, pinta-alaa tai muita levyn lujuuteen ja jäykkyyteen vaikuttavia arvoja ei saa alentaa.

2.9 Ympäristönsuojelulliset näkökohdat

Tämän ohjeen mukaisesti suunnitellut teräsputkisillat eivät aiheuta rakenteista johtuvia ympäristöhaittoja. Pintakäsittelyt tulee tehdä maalaamo-olosuhteissa ja sinkitys ja lisäsuojauksena käytettävät maalit ja muut pinnoitteet kuluvat niin hitaasti ja pieninä pitoisuuksina, niin että niistä ole vaaraa ympäristölle.

3 Mitoitus

3.1 Poikkileikkausarvot

Teräsputkisilloissa käytettävien profiilien poikkileikkausarvoja on esitetty liitteessä 1.

Teräsputkisiltojen profiilien pienimmät sallitut poikkipinta-alat ovat taulukon 3.1 mukaiset. Yksityisteillä taulukon poikkipinta-alat voidaan kertoa luvulla 0,8.

Taulukko 3.1 Profiilien pienimmät sallitut poikkipinta-alat [cm²/m] ja niitä vastaavat ohjeelliset levypaksuudet [mm].

Profiili**	Tiesillat			Rautatiesillat		
	2,0 m ≤ D < 4,0 m	D ≥ 4,0 m	Sillan ali on liikennettä*)	2,0 m ≤ D < 4,0 m	D ≥ 4,0 m	Sillan ali on liikennettä
Pinta-ala [cm ² /m]	≥ 25	≥ 35	≥ 45	≥ 35	≥ 45	≥ 55
C3 [mm]	≥ 2,50	ei käytetä	ei käytetä	≥ 3,25	ei käytetä	ei käytetä
C5 [mm]	≥ 2,00	≥ 2,50	≥ 3,25	≥ 2,50	≥ 3,25	≥ 4,00
A2 [mm]	≥ 2,50	≥ 3,00	≥ 4,00	≥ 3,00	≥ 4,00	≥ 4,75
A12 [mm]	≥ 2,50	≥ 3,00	≥ 3,75	≥ 3,00	≥ 3,75	≥ 4,50
A3 [mm]	ei käytetä	≥ 3,00	≥ 3,50	ei käytetä	≥ 3,50	≥ 4,25
A4 [mm]	ei käytetä	≥ 3,00	≥ 3,50	ei käytetä	≥ 3,50	≥ 4,25
*) Jos tiesillan ali on liikennettä ja putken leveys D < 4,0 m, niin pienin sallittu poikkipinta-ala on 35 cm ² /m.						
**) Profiilien poikkileikkaustiedot liitteessä 1.						

Teräsputkisillan profiililla on oltava riittävä jäykkyys asennuksen mahdollistamiseksi. Teräsputken asentaminen työmaalla helpottuu, kun profiilin jäykkyyttä kasvatetaan.

Uudet vesistön ylittävät teräsputkisillat suunnitellaan siten, että teräslevyn paksuus ja pulttiliitosten lujuus on sama koko poikkileikkauksessa. Tällä tavalla ennakoidaan putkisillan alaosien voimakkaampi syöpyminen. Olemassa olevien putkisiltojen kantavuustarkasteluja tehtäessä todelliset levypaksuudet, pulttiliitosten lujuudet ja rasi-
tusten todellinen jakautuminen voidaan ottaa kantokykyä arvioitaessa huomioon.

3.2 Staattiset kuormat

Teräspankkuisilla suunnittelukuormat ovat Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/* mukaiset niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1991-2 /3/ ja sen kansallisen liitteen vaatimukset.

Teräspankkuisiltojen kuormien jakaantuminen maan ja teräsrakenteen välillä ja teräsrakenteen rasitukset lasketaan käytettävän mitoitusmenetelmän mukaan.

Teräspankkuisilla tukipainuma-, lämpötila-, sivusysäys- ja tuulikuormia ei yleensä tarvitse huomioida. Jarrukuormat voidaan niin ikään jättää huomioon ottamatta kun putken vaakamitta on alle 10 m tai putkisilla korkeuden suhde putken vaakamittaan $h/D \leq 0,4$. Edellä mainitut kuormat tulee kuitenkin sisältyä teräsholvisilla erillisten perustusten mitoitukseen.

3.2.1 Pysyvät kuormat

Maanpaineesta tulevat kuormat sisältyvät ruotsalaisen käsikirjan /2/ voimasuureiden laskentaan. Poikkeuksena tästä ovat teräspankkuisiltojen suuaukkojen viisteet, joita tulee mitoittaa erikseen maanpaine kuormille.

Putkeen kohdistuvasta ympärystäytöstä ja rakennekerroksista aiheutuva pystysuora paine määritetään kaavalla

$$p_m = \gamma \cdot h_c \quad \{1\}$$

missä

γ	on maan tilavuuspaino [kN/m ³]
h_c	on peitesyvyys [m]

Maan tilavuuspainona käytetään taulukon 2.3 mukaisia arvoja riippumatta muista siltojen kuormia koskevista ohjeista ja pohjavedenpinnan tasosta.

Yläpuolisen ja ympärystäytön ominaisuuksien vaihtelut otetaan huomioon kerrosten kuormavarmuuskertoimien avulla. Ympärystäytön ja yläpuolisen oman painon kuormavarmuuskertoimet tulee valita sen mukaan, miten saadaan epäedullisin vaikutus. Samalle maamateriaalille ei kuitenkaan tarvitse asettaa eri varmuuskertoimia, kun sitä käytetään sekä yläpuolisessa että ympärystäytössä.

3.2.2 Tiesillat

Teräspankkuisilla tieliikennekuorma on määritetty eurokoodin soveltamisohjeessa *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/*. Tiesilla mitoituksessa käytetään kuormakaavioille LM1 ja LM2 kaavojen {2a} ja {2b} mukaisia sovituskertoimia ellei tilaajan kanssa ole toisin sovittu. Sovituskertoimia ei käytetä väsytyksessä kuormakaavioon LM2.

$$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{D - 2m}{4m}, \text{ kun } 2 \text{ m} \leq D \leq 6 \text{ m} \quad \{2a\}$$

$$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q = 1,0, \text{ kun } D > 6 \text{ m} \quad \{2b\}$$

missä

D on sillan jännemitta [m]

Kaistojen ulkopuolelle jäävillä alueilla kuormia ei ole, joten $\alpha_{qr} = 0$

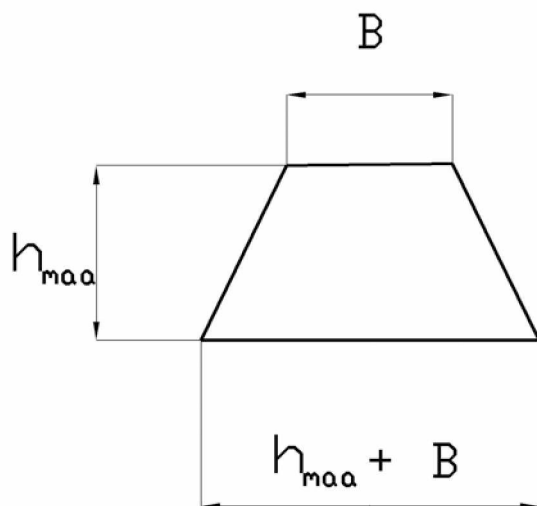
Kuormakaavio LM3 lasketaan tasaisena pinta-alakuormana 45 kN/m² ja kuormakaavion LM3:n sovituskertoimen on jännemitasta riippumatta $\beta_{Q1} = 0,8$.

Yksityisteillä kaikki sovituskertoimet ovat aina 0,8, ellei hankekohtaisesti toisin päätetä.

Kuormakaavioihin LM1, LM2 ja LM3 sisältyy dynaaminen lisä. Peitesyvyyden kasvaessa yli 2 metriin dynaaminen lisä voidaan pienentää /2/ kaavojen {3} mukaisella kertoimella r_d seuraavasti:

$$\begin{aligned} r_d &= 1, & \text{kun } h_{c,red} < 2 \text{ m} \\ r_d &= r_d = 1,1 - 0,05 \cdot h_{c,red}, & \text{kun } 2 \text{ m} \leq h_{c,red} \leq 6 \text{ m} \\ r_d &= 0,8, & \text{kun } h_{c,red} > 6 \text{ m}. \end{aligned} \quad \{3\}$$

Pyörien kuormituspinnot ovat eurokoodien soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ ja standardin SFS-EN 1991-2 /3/ mukaiset. FEM:llä tai vastaavilla menetelmillä laskettaessa kuormien jakautumisen tien poikkisuuntaan voidaan olettaa olevan kuvan 3.1 mukainen.



B = pyörä- tai telikuorman leveys tai rautatiesilloilla ratapölkyn leveys ($B = 2,6 \text{ m}$ betonipölkylle)

h_{maa} = peitesyvyys tieliikennekuormien kohdalla = h_c

h_{maa} = peitesyvyys pölkyn alapinnasta junakuormien kohdalla

Kuva 3.1 Pyörä- tai muun pintakuorman jakautuminen tien poikkisuunnassa.

3.2.3 Rautatiesillat

Rautatiesillat mitoitetaan eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ ja standardin SFS-EN 1991-2 /3/ mukaiselle junakuormalle LM71-35, ellei tilaaja ole toisin ilmoittanut.

Rautatiesilloilla liikennekuorman jakaantumisessa ja ekvivalenttia liikennekuormaa $p_{traffic}$ laskettaessa peitesyvyytenä käytetään ratapölkkyjen alapinnasta mitattua peitesyvyyttä. Muussa laskennassa kuten esimerkiksi pysyvän kuorman vaikutuksen ja radan liikennekuorman sysäyslisän laskennassa käytetään todellista peittosyvyyttä $h_{c,red}$.

Junakuorman dynaaminen suurennuskerroin ϕ_2 määritetään eurokoodien soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ ja standardin SFS-EN 1991-2 /3/ mukaan käyttäen nimellisen jännemitan arvoa $L_\phi = D$.

Rautatiesillat mitoitetaan suurimmalle taivuttavalle momentille ja vastaavalle normaalivoimalle sekä erikseen suurimmalle normaalivoimalle ja vastaavalle taivutusmomentille seuraavia laskentasääntöjä soveltaen:

1. Suurin taivuttava momentti:

Kuormana on kuormakaavion LM71-35 akselikuormat sysäyslisineen. Pohjapaine σ_v lasketaan akselikuormien keskipisteestä. Mikäli raiteita on useita, pohjapaine σ_v lasketaan määrävän raiteen akselikuormien keskipisteestä.

2. Suurin normaalivoima:

Silta mitoitetaan kuormakaaviole LM71-35 sysäyslisineen.

Kuormakaavion nauhakuorma voidaan korvata tasaisella pintakuormalla (kuva 3.1), jonka suuruus on

$$q = \frac{120 \text{ kN/m}}{B + h_r} \quad \{4\}$$

Kuormakaavion akselikuormat voidaan korvata tasaisella ekvivalentilla pinta-kuormalla, jonka suuruus on

$$q' = \frac{111 \text{ kN/m}}{B + h_r} \quad \{5\}$$

Kuormat q ja vaikutukset q' lasketaan yhteen. Koska pinta-alakuorma q' vaikuttaa 6,4 m:n pituudella, sen vaikutus voidaan ottaa huomioon erillisenä ekvivalenttina liikennekuormaa $p_{traffic}$ samalla tavalla kuin akselikuormat kohdassa 1. Pohjapaine σ_v' lasketaan raiteen keskikohdalta ja sen suuruus on

$$\sigma_v' = 0,48 \cdot \sigma_v \quad \{6\}$$

Mikäli raiteita on useita, muiden kuin määrävän raiteen akselikuormat otetaan huomioon vastaavalla tavalla kuin kohdassa 1. Mikäli usean raiteen kuvan 3.1 mukaiset kuormitusalueet peittävät toisensa siten, että niiden kokonaisvaikutus suurenee, pintakuorma q lasketaan yhteenlasketun arvon mukaan.

3.2.4 Kevyen liikenteen sillat

Kevyen liikenteen kuormina käytetään soveltamisohjeen NCCI 1 /11/ mukaista tasaisesti jakautunutta tungoskuormaa 5 kN/m² ja standardin EN 1991-2 kuvan 5.2 mukaista 12 tonnin huoltoajoneuvoa, ellei hankekohtaisesti toisin päätetä. Tungoskuorma ja huoltoajoneuvo eivät sijaitse sillalla yhtä aikaa. Mikäli ajoneuvojen pääsyä sillalle ei ole estetty, mitoitetaan kevyenliikenteen silta kuten yksityistien silta.

3.2.5 Ekvivalentti viivakuorma

Mitoitettaessa teräsputkisilta ruotsalaisen käsikirjan /2/ mukaan kuormasta syntyvä pohjapaine σ_v akselikuormista syvyydellä z lasketaan Boussinesqin kaavalla ja muutetaan sen jälkeen ekvivalentiksi viivakuormaksi syvyydellä $z = h_{c,red}$ kaavan {7} mukaan.

$$p_{traffic} = \pi \cdot h_{c,red} \cdot \frac{\sigma_v}{2} \quad \{7\}$$

Ekvivalentti viivakuorma ei kuvaa todellista liikennekuormaa vaan se on laskennallinen tietä vastaan kohtisuora viivakuorma [kN/m], jota käytetään putkisilltan tulevien normaalivoimien ja taivutusmomenttien laskentaan ruotsalaisen käsikirjan /2/ mukaisesti.

Akselikuormien kanssa samanaikainen tasainen pintakuorma $\alpha_{q1} \cdot q_{ik}$ otetaan erikseen huomioon sellaisenaan.

Kuvassa 3.2 on valmiiksi laskettu ekvivalentti viivakuorma $p_{traffic}$ tavanomaisille kuormitustapauksille, jotka ovat:

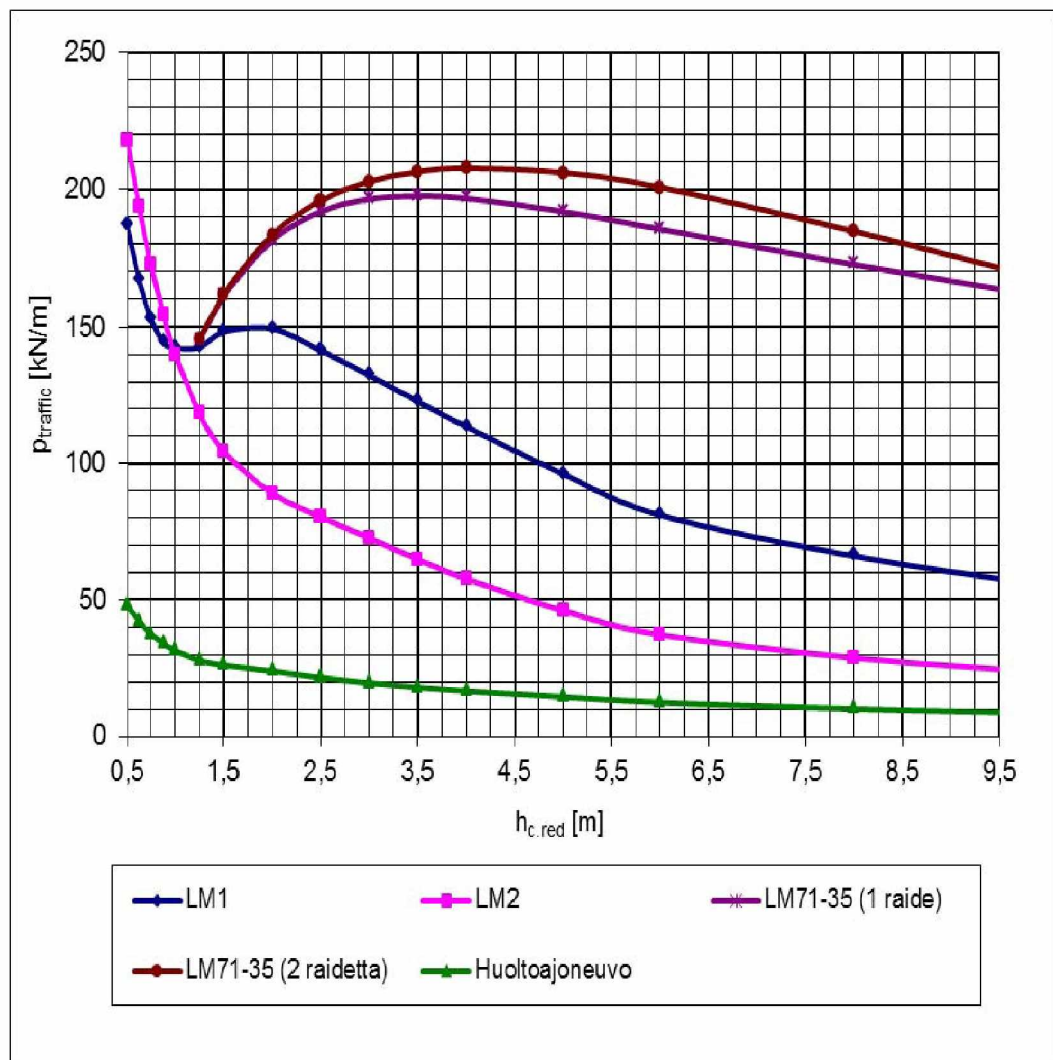
1. Kuormakaavion LM1:n /11/ akselikuormat 2·300 kN määrävällä kaistalla sekä 2·200 kN viereisellä kaistalla.
2. Kuormakaavion LM2:n /11/ akselikuorma 400 kN yhdellä kaistalla.
3. Kuormakaavion LM71-35 /11/ akselikuormat yhdeltä raiteelta ilman sysäyslisää.
4. Kuormakaavion LM71-35 /11/ akselikuormat kahdelta raiteelta ilman sysäyslisää. Raiteiden keskiöetäisyys on 4,5 m.
5. Huoltoajoneuvo, eurokoodien soveltamisohjeen /11/ mukainen kevyenliikenteenväylän huoltoajoneuvo.

Kuvan 3.2 käyrissä ei ole otettu huomioon kaavojen {2} mukaisia sovituskertoimien (α_i ja β_i) vähennyksiä kuorman $p_{traffic}$ intensiteetissä.

Kaavan {3} mukainen dynaamisen lisän pienennys on otettu huomioon kuormakaavioiden LM1 ja LM2 käyrissä kuvassa 3.2.

Kuormakaavion LM1 tasainen pinta-alakuorma 9,0 kN/m² on otettava huomioon kuvasta 3.2 saatavan ekvivalentin viivakuorman lisäksi.

Junakuorman dynaamisen suurennuskertoimen ϕ_2 aiheuttama lisä lisätään kuvasta 3.2 saatuihin arvoihin.



Kuva 3.2 Ekvivalentti viivakuorma

3.3 Väsyttävät kuormat

Kevyen liikenteen silloille ei tarvitse tehdä väsymismitoitusta.

3.3.1 Tiesillat

Jännemitaltaan korkeintaan 8 metristen tiesiltojen väsymismitoitusta perustuu väsytytkuormakaavioon FLM4. Tiesillat, joiden jännemitta on enemmän kuin 8 metriä, mitoitetaan väsytytkuormakaaviole FLM3. Kaikki tiesillat voidaan mitoitaa väsytytkuormakaaviole FLM1, mutta useimmissa tapauksissa se on liian ankara.

3.3.2 Rautatiesillat

Rautatiesiltojen väsytytkuormat lasketaan kuormakaaviole LM71 ominaisarvoilla huomioiden dynaaminen suurennuskerroin Φ_2 .

3.4 Osavarmuusluvut

Maaparametreja laskettaessa osavarmuusluvut ovat:

$\gamma_{n,geo} = 1.0$, geotekninen kantavuus

$\gamma_{m,\varphi} = 1.0$, kitkakulma

$\gamma_{m,E} = 1.0$, tangettimoduuli

$\gamma_{m,surr} = 1.0$, sivutäytön tilavuuspaino

$\gamma_{n,cover} = 1.0$, yläpuolisen täytön tilavuuspaino

Kuormien ja materiaalien osavarmuuskertoimet on koottu taulukkoon 3.2. Kevyen liikenteen silloilla käytetään tiesiltojen osavarmuuskertoimia.

Taulukko 3.2 Varmuuskertoimet

Kuormakertoimet		
Pysyvä kuorma, käyttörajatila	Y_{gk}	1
Pysyvä kuorma, murtorajatila	Y_{gd}	NCCI 1:n /11/ mukaan
Liikennekuorma, käyttörajatila	Y_{pk}	1,0 tai 0
Tiesillan liikennekuorma, murtorajatila	Y_{pd}	NCCI 1:n /11/ mukaan
Tiesillan liikennekuorma, väsytyksrajatila	Y_{Ff}	1,0
Raideliikenteen sillan liikennekuorma, murtorajatila	Y_{pd}	1,45 tai 0
Raideliikenteen sillan liikennekuorma, väsytyksrajatila	Y_{Ff}	1,0
Sovituskertoimet tiesilloille, kuormat LM1 ja LM2, $D = 2-6,0$ m	$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q$	$0,8 + 0,2 \cdot (D - 2) / 4m$
Sovituskertoimet tiesilloille, kuormat LM1 ja LM2, $D \geq 6,0$ m	$\alpha_{qi}, \alpha_{Qi}, \beta_Q$	1,0
Sovituskertoimet tiesilloille, kuorma LM3	β_{Q1}	0,8
Geotekniset varmuuskertoimet		
Tilavuuspainot, moduulit, kitkakulmat	Y_{geo}	1,0
Teräksen varmuuskertoimet, staattinen kuorma		
Teräksen murtuminen, muokkaamaton poikkileikkaus	Y_{M0}	1,0
Teräksen murtuminen, mataloitettu poikkileikkaus	Y_{M0red}^*	1,15
Teräksen varmuuskertoimet, väsyttävä kuorma		
Sillat $D = 2-6,0$ m	Y_{Mf}	$1,0 + 0,15 \cdot (D - 2) / 4m$
Sillat $D > 6,0$ m	Y_{Mf}	1,15
Raideliikenteen sillat, aina	Y_{Mf}	1,35
Liitoksen varmuuskertoimet, staattinen kuorma		
Pultin ja yksityiskohtien kestävyys	Y_{M2}	1,25
Pultin liukuma	Y_{M3}	1,25
Pultin esijännitys	Y_{M7}	1,1
Liitoksen varmuuskertoimet, väsyttävä		
Pultin kestävyys, $D = 2 \dots 6,0$ m	Y_{M2f}	$1,0 + 0,15 \cdot (D - 2) / 4m$
Pultin kestävyys, $D > 6,0$ m	Y_{M2f}	1,15
Pultin liukuma	Y_{M3f}	1,0
Pultin esijännitys	Y_{M7f}	1,0
*) Koskee ainoastaan kierresaumattuja teräsputkia		

3.5 Voimasuureet

3.5.1 Ruotsalainen mitoitusohje

Maan painon ja liikennekuorman voimasuureet voidaan laskea ruotsalaisen mitoitusohjeen *Design of soil steel composite bridges /2/* tai FEM:n avulla.

Ruotsalaista mitoitusohjetta /2/ voidaan soveltaa kun ylikulkevan väylän pituuskaltevuus on enintään 10 %. Mitoitusohjeen käyttö edellyttää myös, että täyttöjen laajuus, poikkileikkauksen kaarevuussäteiden suhteet, rakenteen jäykkyys jne. täyttävät saman ohjeen vaatimukset.

Ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaan putkisilta voidaan sijoittaa joko kaivantoon tai penkereeseen. Kaivantoon sijoitetussa putkisillassa voidaan huomioida ympäröivän maan holvaantumisen tuoma helpotus. Putkisilta voidaan tulkita kaivantoon sijoitukseksi myös silloin, kun sillan kohdalla on penger edellyttäen, että joku alla olevista ehdoista 1–3 täyttyy:

1. Putken korkeudesta 2/3-osaa on ympäröivän maanpinnan alapuolella.
2. Tie- tai ratapenkereen yläosan leveys on vähintään 2 kertaa suurempi kuin putken suurin vaakamitta D .
3. Tienpenkereen sivukaltevuus putken kohdalla on vähintään 1:1,75.

Tapauksissa, missä yllä mainitut ehdot eivät täyty, sillan päällä olevan maan holvi-vaikutusta ei oteta huomioon mitoituksessa ($S_{ar}=1$, ruotsalainen käsikirja /2/ kaava (4.g)).

Kehämäisen ”Box culvert” tyyppisten ja muiden laakeiden teräsputkisiltojen (laen ja nurkan säteiden suhde on yli 4) mitoituksessa holvi-vaikutusta ei saa huomioida ($S_{ar}=1$).

Täyttötöytä tehtäessä putken laki nousee ja se pienentää tehollista peittosyvyyttä, mikä pitää ottaa huomioon laskelmissa. Laen nousun suuruus on laskettava ja merkittävä suunnitelmapiirustuksiin arviona täyttötöyän aikaisesta laen noususta.

3.5.2 FEM

Putkisiltojen kantavuutta laskettaessa FEM:llä tai vastaavilla menetelmillä laskenta voidaan suorittaa tasotapauksena, jolloin kuormien jakautuminen tien poikkisuuntaan voidaan olettaa olevan kuvan 3.1 mukainen. FEM menetelmiä on käytettävä harkiten, koska teräsputken ja maan yhteistoiminnan oikeanlainen mallintaminen voi olla haasteellista.

FEM menetelmän käyttö siltojen mitoituksessa tulee kysymykseen vain tapauskohtaisesti. Tällöin on sovittava tilaajan kanssa mm.,

- Millä testeillä laskentamenetelmän sopivuus maan ja teräksen yhteistoiminnalle varmistetaan.
- Mitä maaparametreja ja osavarmuuskertoimia tulee käyttää käyttö- ja murto-rajatilassa.
- Tuleeko laskennan ja työsuorituksen varmistamiseksi tehdä siltojen koe-kuormituksia todellisen kantavuuden varmentamiseksi.

3.5.3 Normaaliveima

Normaaliveiman oletetaan vaikuttavan samansuuruisena koko putken kehällä.

3.5.4 Momentti

Mitoitava oman painon momentti putken laessa kehittyy kolmessa vaiheessa:

- Kun täyttötyö saavuttaa putken laen, putken katossa on työnaikainen negatiivinen momentti suurimmillaan.
- Kun täyttötyö on valmis, putken laessa on täysi pysyvien kuormien aiheuttama momentti. Momentti on pienillä täyttösyvyyksillä negatiivinen, muuten positiivinen.
- Kun täyttötyö on valmis ja putkea kuormittaa liikennekuorma, putken laen momentti on täysin kehittynyt.

Putkille, joissa säteiden suhde $R_t/R_s \geq 1$, voidaan putken sivualueella vaikuttava momentti laskea seuraavilla ohjeilla:

- Omanpainon aiheuttama momentti on $-2/3$ kertaa putken laessa vaikuttava momentti.
- Liikennekuorman aiheuttama momentti on $-1/3$ kertaa putken laessa vaikuttava momentti.

Putken sivualueeksi luetaan sillan poikkileikkauksessa se alue, joka sijaitsee nurkan kaarrelevyn R_s alueella tai sen alapuolella ja vähintään putken $D/2$ leveän keskialueen ulkopuolelle, ohje /2/ kuvat 1.3A-G.

Negatiiviseen suuntaan vaikuttava liikennekuormien momentti on $-1/2$ kertaa määräävään suuntaan (positiivinen) vaikuttava momentti.

3.6 Geotekniikka

Teräsputkisillan geotekninen mitoitus tehdään eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 /10/* ja ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu /35/* mukaan niin, että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/ ja sen kansallisen liitteen (LVM) vaatimukset.

Perusmaan painumille on asetettu rajat kohdassa 5.4.2.

3.7 Putki

3.7.1 Staattinen mitoitus

Teräsputkisillan teräsrakenne mitoitetaan käyttö- ja murtorajatilassa eurokoodien SFS-EN 1993-1-1 /4/, SFS-EN 1993-2 + AC /7/, SFS-EN 1993-1-8 /5/ ja SFS-EN 1993-1-9 /6/ mukaisesti. Teräsjännitykset eivät saa käyttörajatilassa ylittää teräksen myötörajan pysyvien ja liikennekuorman ominaiskuormilla.

Teräsputkisillan tulee murtorajatilassa olla niin kestävä, ettei rakenne murtumisen, myötäämisen tai lommahtamisen takia menetä kantavuuttaan

Poikkileikkauksen paikallinen lommahtaminen lasketaan ruotsalaisen ohjeen /2/ liitteen 1 mukaan. Mikäli putkiprofiili on pienen taivutussäteen vuoksi aallotettu myös poikittain, myötömomentti on ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaisesti rajoitettava 60 % aallottamattomasta arvosta. Samansuuruinen vähennys on tehtävä myös rakenteen taivutusjäykkyydestä. Tämä koskee vain yli 5 mm:n paksuisia levyjä. Alle 5 mm:n paksuisissa levyissä taivutuskapasiteetin pienennys on laskettava erikseen.

Teräsputkisillan lakipiste on kaaren nurjahduksen estämiseksi tarkistettava epälineaarisesti käyttäytyvälle yhdistetylle normaalivoimalle ja momentille. Tarkistus voidaan tehdä ruotsalaisen käsikirjan /2/ mukaisella kaavalla {8}.

$$\left(\frac{N_d}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \frac{M_d}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad \{8\}$$

missä

N_d	on teräsputkessa vaikuttava normaalivoiman mitoitusarvo [kN/m]
N_{cr}	on maahan upotetun teräsputkisillan plastinen nurjahduskestävyys, lasketaan <i>käsikirjan /2/ liitteen 5 mukaan</i> . [kN/m]
α_c	on normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuskerroin
M_d	on teräsputkessa vaikuttava taivutusmomentin mitoitusarvo [kNm/m]
$M_{y,Rd}$	on aallotetun teräsprofiilin plastinen taivutusmomentti-kestävyys [kNm/m]

$$M_{y,Rd} = \eta \cdot W_y \cdot f_{yd} \quad \{9\}$$

missä

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\alpha_c = \eta^2 \cdot \omega \geq 0,8$$

$$\eta = \frac{Z}{W_y}$$

η on plastisen ja elastisen taivutusvastuksen suhde 1,35, ellei muuta arvoa ole osoitettavissa

$$\omega = \frac{N_{cr}}{A_y \cdot f_{yd}} \quad \{10\}$$

A_y on teräsputkisillan kaaren poikkipinta-ala [mm²/mm].

Teräsputkisillan kaavan {8} mukainen nurjahduskestävyys on tarkistettava sekä maksimi momentille että vastaavalla normaalivoimalle että maksimi normaalivoimalle kun momentti on 0.

Teräsputkisillan nurjahtaminen, riittävä jäykkyys asennusaikana ja maanpaineen ylityminen elliptisen sillan alanurkassa tarkistetaan tekemällä ruotsalaisen ohjeen /2/

mukaiset tarkastelut ja varmistamalla, että putkisillan jäykkyyssarvot ja poikkileikkausosien taivutussäteiden suhteet sekä rakenteen jäykkyyssluvut täyttävät saman ohjeen mukaiset vaatimukset.

3.7.2 Tiesillan taipuma

Teräspankukisillan taipuma ei saa tieliikennekuormilla ylittää arvoa $D/400$. Taipuma lasketaan käyttäen kuormien tavallista yhdistelmää.

Tieliikenteen kuormilla taipuman voidaan olettaa alittavan edellä mainittu taipumara ja teräspankukisillalla, jonka laen säde on alle 9 m ja jännemitta alle 12 m ja joka suunnitellaan tämän ohjeen mukaan sekä rakennetaan ohjetta *Teräspankukisilla, Rakentamisen laatuvaatimukset /26/* noudattaen.

Taipuman laskenta voidaan tehdä joko tilaajan hyväksymällä FEM-mallilla tai arvioimalla teräsprofiilin ylä- ja alapinnan jännitysten avulla.

3.7.3 Rautatiesillan taipuma

Teräspankukisillan taipuma ei saa raideliikenteen kuormilla liikenteen turvallisuuden takia ylittää arvoa $D/600$ ja matkustusmukavuuden takia ylittää arvoa $D/1000$, kun junan nopeus $v \leq 200$ km/h ja $D/1400$, kun $v > 200$ km/h. Liikenteen turvallisuuden taipumatarkastelu tehdään käyttäen luokiteltua kuormakaaviota LM71-35 ($\alpha = 1,46$) ja matkustusmukavuuden taipumatarkastelu käyttäen luokittelematonta kuormakaaviota ($\alpha = 1,00$).

Raideliikenteen kuormilla taipumien voidaan olettaa alittavan edellä mainitut taipumarajat teräspankukisillalla, jonka laen säde on alle 6 m ja jännemitta alle 8 m ja joka suunnitellaan tämän ohjeen mukaan sekä rakennetaan ohjetta *Teräspankukisilla, Rakentamisen laatuvaatimukset /26/* noudattaen.

3.8 Pulttiliitos

Teräspankukisillan liitokset tulee mitoittaa niin kestäviksi, etteivät niiden lujuudet missään kuormatilanteessa ylitä. Teräspankukisillan liitokset mitoitetaan eurokoodien SFS-EN 1993-1-8 /5/ ja SFS-EN 1993-2 /7/, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltöjen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 /11/* sekä tässä ohjeessa annettujen lisäohjeiden mukaan. Pulttien ja aluslevyjen on oltava standardin EN 1090-2 /25/ mukaisia.

Putkisillan valmistajan tulee käyttää liitoksissa ennalta testattuja ja hyväksytyjä erikoispultteja tai tavanomaisia pultteja yhdessä aluslevyjen kanssa, joita on muotoiltu aallotettua teräsprofiilia varten. Pultin muodon tulee parantaa kosketusta aaltomaista teräspintaa vastaan siten, että liitoksesta tulee tiukka ja kitkavoima kasvaa pienestään liikkeestä.

Liitokset valmistetaan liukumattomiksi eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 /5/ kohdan 3.4.1 kiinnitysluokan B tai C mukaisiksi kiristämällä pultit vähintään InfraRyl taulukossa 42040:T2 /13/ mainittuun esijännitysvoimaan. Suunnitelmissa määritellään tarvittava pulttien esijännitysvoima. Laskennallisesti voidaan määritellä pultin tarvittava kiristysväöntömomentti esimerkiksi kaavalla (RIL 173-1997 /36/ kohta 9.3.4 kaava 9.1):

$$M_a = 1,1 \cdot \mu_0 \cdot d \cdot F_{p,C}, \quad \{11\}$$

jossa $\mu_0 = 0,18$ vastaa tilannetta missä ruuvit ja mutterit ovat ohuesti öljyntyjä. Käytettäessä muunlaista käsittelyä ruuveissa ja muttereissa korjataan μ_0 :narvoa vastaavasti.

Pultin kestävyysien mitoitusarvot lasketaan eurokoodin SFS-EN 1993-1-8 /5/ taulukon 3.4 mukaisesti.

Pultin leikkauslujuus lasketaan kaavalla

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad \{12\}$$

ja vetolujuus kaavalla

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad \{13\}$$

missä

A_s	on pultin jännityspoikkipinta-ala, yleensä 0,78·A.
f_{ub}	on pultin vetomurtolujuus
α_v	lujuusluokilla 4.6, 5.6 ja 8.8 kerroin = 0,6 lujuusluokilla 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9 kerroin = 0,5
k_2	on teräsputkisilloissa käytettävillä pulteilla 0,9.

Kun pultissa vaikuttaa samanaikaisesti leikkaus- ja vetovoima, yhteisvaikutus tarkistetaan kaavalla

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad \{14\}$$

missä

$F_{v,Ed}$	on pultille kuormien kautta tuleva leikkausvoima [kN]
$F_{t,Ed}$	on pultille kuormien kautta tuleva vetovoima [kN].

Pulttireikien reunaetäisyydet ja keskiövälit tulee olla eurokoodien SFS-EN 1993-1-9 /6/ väsyttävien kuormien asettamien vaatimusten mukaiset, eli reunaetäisyyksien (e_1 ja e_2) tulee olla vähintään $1,5 \cdot d$ ja keskiövälien (p_1 ja p_2) vähintään $2,5 \cdot d$. Luku d on pultin nimellishalkaisija.

Pultin leikkauskestävyyttä tulee tarkistaa reunapuristuskestävyydelle kun pultille tuleva leikkausvoima ylittää pultin kitkavoiman. Reunapuristuskestävyys lasketaan kaavalla {15}.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad \{15\}$$

missä

d	on pultin halkaisija [mm]	
t	on levyteräksen ainevahvuus [mm]	
k_1	on reunapulteille	$2,8 \cdot \frac{e_2}{d_o} - 1,7 \leq 2,5$
	ja muille pulteille	$1,4 \cdot \frac{p_2}{d_o} - 1,7 \leq 2,5$
	missä e_2 [mm] on reunimmaisten pulttien keskiön reuna-etäisyys ja p_2 [mm] rinnakkaisten pulttien keskiöetäisyys kohtisuoraan voimaa vastaan ja d_o [mm] pultin reiänhalkaisija.	
α_b	on teräspultkisilloissa käytettävillä pulteilla 1,0, koska voiman suunta on aina levyn reunasta poispäin.	

missä e_1 [mm] on pulttien keskiön etäisyys levyn päädyistä ja p_1 [mm] pulttien keskiöetäisyys voiman suunnassa.

Reunapuristuslujuutta alennetaan kertomalla luvulla 0,8, mikäli pulttinreikä tehdään standardiarvoja /5/ suuremmalla väljyydellä.

Pultteihin kohdistuvasta leikkausvoimasta voidaan vähentää kitkavoima ja mitoittaa liitos reunapuristukselle siltä osin kun leikkausvoima ylittää saumaan tulevan kitkavoiman. Yhden pultin leikkausvoimasta vähennettävä kitkavoima lasketaan kaavalla

$$F_{s.Rd} = \frac{k_s \cdot \mu \cdot \left(\frac{F_{p.C}}{\gamma_{M7}} \right)}{\gamma_{M3}} \quad \{16\}$$

missä

$$\begin{aligned} \mu &= 0,4 \\ k_s &= 0,85 \\ F_{p.C} & \text{ EN 1993-1-8 taulukko 3.6 /5/} \\ & \text{on pultille tuleva esijännitysvoima [kN]} \end{aligned}$$

Liitoksessa ruuvien vetovoimat tasapainottuvat puristetun puolen kosketusvoimilla, joten liukumiskestävyyden pienennystä kitkavoimasta ei tarvitse tehdä.

Pultin läpileikkautumislujuus lasketaan kaavalla

$$B_{b.Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad \{17\}$$

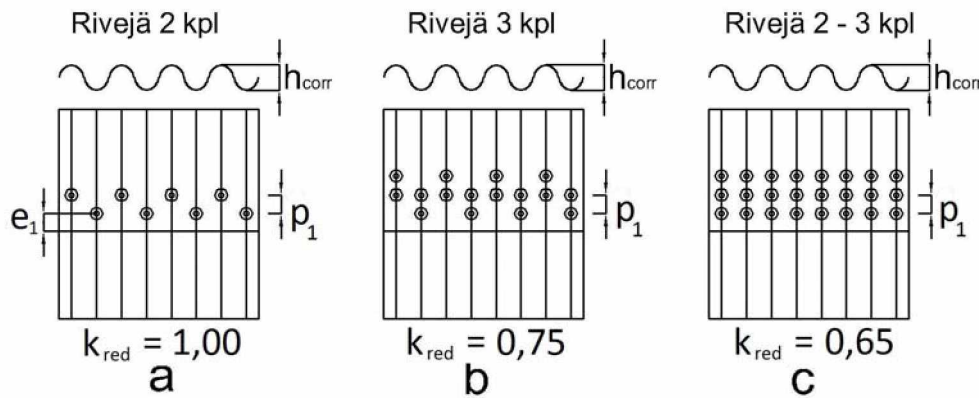
missä

$$\begin{aligned} d_m & \text{ on mutterin tai pultin kannan ulkohalkaisija} \\ f_u & \text{ on levyteräksen vetomurtolujuus.} \end{aligned}$$

Pultin mitoituksessa tulee lisäksi ottaa huomioon seuraavaa:

- Reiän koko saa olla enintään 4 mm pultin nimellishalkaisijaa suurempi
- Pultin koko on vähintään M20

- Pulttin kannat ja mutterit ovat niin muotoiltuja, ettei murtumista tapahdu pulttin tai levyteräksen kosketuspinnassa kun pulttia vedetään murtolujuuteen saakka reikää vasten, jonka suuruus on vähintään 4 mm pulttin nimellishalkaisijaa suurempi
- Pulttin kannat ja mutterit ovat niin kestäviä, että murtuminen sekä veto- että väsymistestissä tapahtuu aina pulttin varren eikä pulttin kannan tai mutterin kohdalta; testausolosuhteiden tulee vastata putkisillan päittäisliitosta
- Levyjen päittäisliitoksessa pulttit sijoitetaan yleensä kahteen riviin siten, että pultteja on yksi pultti jokaisen aallon harjalla ja pohjassa vuorotellen, kuva 4.1 a
- Mikäli levyjen päittäisliitos edellyttää pulttien lisäämistä, pultteja tulee sijoittaa kuvan 3.3 b tai 3.3 c mukaan, jolloin liitoksen lujuutta on kuvan 3.3 b tapauksessa alennettava kertomalla lujuusarvot luvulla 0,75 ja kuvan 3.3 c tapauksessa luvulla 0,65.
- Mitan p_1 on oltava vähintään 50 mm ja enintään 150 mm (kuva 3.3)
- Pulttiliitos mitoitetaan yksileikkisenä.



Kuva 3.3 Levyjatkoksen rei'itys

Levyjen aallon harjan suunnassa levyjen limityksen tulee olla vähintään puolen aallon pituinen. Limityskohtaan tulevien pulttien välinen etäisyys saa olla enintään:

- 250 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus (h_p) on $50 \text{ mm} \leq h_p \leq 60 \text{ mm}$
- 350 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus (h_p) on $60 \text{ mm} < h_p < 110 \text{ mm}$
- 450 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus (h_p) on $110 \text{ mm} \leq h_p \leq 160 \text{ mm}$

Mikäli pulttiliitos on rakenteellisesti suunniteltu siten, että liitettävät levyt eivät asetu tiiviisti toisiaan vasten, pultin leikkauslujuutta ei oteta huomioon (kuva 3.4). Suurimpana sallittuna rakona levyjen välissä pidetään pultin varren nimellishalkaisijan yhtä kymmenesosaa.



Kuva 3.4 Pultti, jolla ei ole leikkauslujuutta

3.9 Laen ja nurkkien vahvistaminen

Tätä ohjetta voidaan yhdessä ruotsalaisen käsikirjan /2/ kanssa soveltaa monilevy-rakenteisten teräsputkisilltojen vahvistamiseen seuraavin ehdoin:

- Teräsrakenteen vahvistus muodostuu kehän lakialueella ja tarvittaessa myös kehän nurkka-alueelle profiilin päälle kiinnitetyistä ylimääräisistä levyistä
- Lakialueen vahvikelevyt on asennettu kehän keskipisteen suhteen symmetrisesti ja niiden pituus on vähintään $0,5 \cdot L_d$
- Mahdolliset vahvikelevyt nurkkiin peittävät kehän kaarevan nurkkaosan (R_s) kokonaan
- Vahvikelevyt peittävät sillan sivusuunnassa vähintään 50 % kehän pinta-alasta ja vahvikelevyjen keskinäinen etäisyys on enintään 750 mm
- Teräksisen kehärakenteen korkeus h suhteessa kehärakenteen vaakasuoran osan pituuteen L_d on enintään 0,35
- Voimasuureita laskettaessa maan ja teräsrakenteen kaavan (4.p) /2/ jäykkyyssuhdetta λ_f on reducedoitu kaavan {19} mukaan
- Teräsputkisillan nurjahduskuormaa laskettaessa profiilin jäyhyysmomenttina käytetään arvoa $I_y = \lambda_{Nred} \cdot 0,5 \cdot I_{fy}$, missä λ_{Nred} on kuvan 3.5 mukainen kerroin
- Vahvistukseen sijoitetaan pultteja vastakkain tulevien aaltojen kohdalle ja ne mitoitetetaan murtorajatilassa kaavojen {21} ja {22} mukaisille leikkausvoimille ja tarkistetaan kaavojen {23} ja {24} mukaiselle väsytykestävyydelle.
- Pulttien koon tulee olla vähintään M20 ja pulttien jakovälin putken suunnassa enintään 600 mm ja sillan suunnassa enintään
 - 250 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus (h_p) on $50 \text{ mm} \leq h_p \leq 60 \text{ mm}$
 - 350 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus (h_p) on $60 \text{ mm} < h_p < 110 \text{ mm}$
 - 450 mm, kun yksittäisen profiilin korkeus (h_p) on $110 \text{ mm} \leq h_p \leq 160 \text{ mm}$

Kaavan {22} leikkausvoimaa vastaavat pultit voidaan jakaa tasan koko vahvikelevyn alueelle tai vaihtoehtoisesti siten, että kaavojen {22} ja {23} termien N_d vastaavat pultit sijoitetaan kokonaan tai osittain levyjen molempiin päihin. Levyn päihin tulevien pulttien lukumäärän tulee olla sama molemmissa päissä.

Vahvikelevyjen kokonaispulttimäärässä on huomioitava myös vahvistamattoman rakenteen staattisen mitoituksen mukainen pulttimäärä.

Maanpainosta aiheutuvan normaalivoiman laskennassa kaavan (4.c) /2/ termissä

$$0,2 \cdot \frac{H}{D} \cdot p_1 \cdot D^2, \quad \{18\}$$

D korvataan arvolla $2 \cdot R_s$, missä

R_s on putken nurkan säde [m]

$$\lambda_{fred} = \lambda_f \cdot \frac{\delta_{rf}}{\delta_{urf}} \quad \{19\}$$

missä

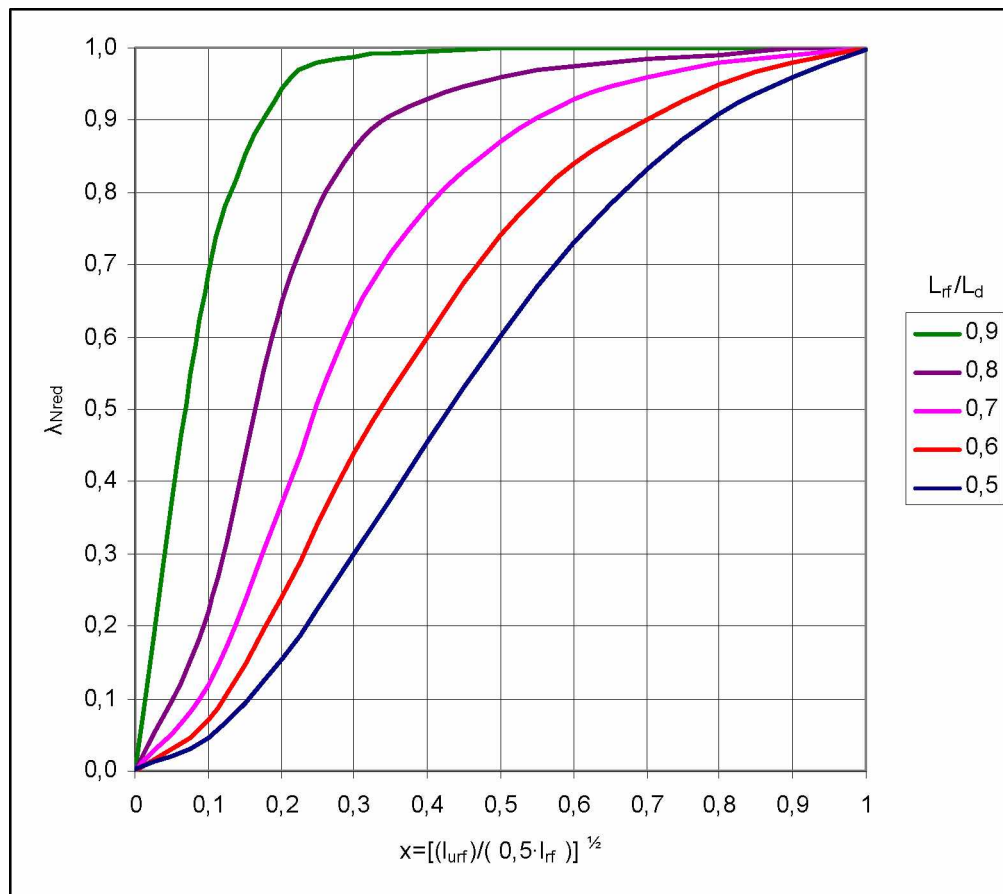
λ_f	on vahvistamattoman teräsputkisillan maan ja teräsrakenteen jäykkyyssuhdetta kuvaava luku, /2/ kaava (4.p).
λ_{fred}	on vahvistetun teräsputkisillan redusoitu maan ja teräsrakenteen jäykkyyssuhdetta kuvaava luku.
δ_{urf}	on vahvistamattoman ja vapaasti seisovan teräsrakenteen taipuma jänteen keskellä yksikkökuormasta.
δ_{rf}	on vahvistetun ja vapaasti seisovan teräsrakenteen taipuma jänteen keskellä yksikkökuormasta, kun vahvistetulla osalla oletetaan olevan täysi liittävaikutus.

Kuvassa 3.5

$$x = \sqrt{I_{urf} / 0,5 \cdot I_{rf}} \quad \{20\}$$

ja

I_{urf}	on vahvistamattoman teräsprofiilin jäyhyysmomentti [mm ⁴ /mm]
I_{rf}	on vahvistetun teräsprofiilin jäyhyysmomentti [mm ⁴ /mm]
L_{rf}	lakialueen vahvikelevyn pituus [m]
L_d	on terässillan nurkkien välinen vaakasuora etäisyys [m]



Kuva 3.5 Vahvistetun "Box culvert" sillan jäyhyysmomentin reduktiokerroin λ_{Nred} .

Laen vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima lasketaan kaavasta {21} ja nurkan vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima kaavasta {22}.

$$V_{db} = \frac{8 \cdot |M_d| / d_{tot} + |N_d|}{L_d} \quad \{21\}$$

missä

V_{db} on laen vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima [kN/m²]
 M_d on lakipisteen mitoittava taivutusmomentti [kN·m/m]
 N_d on sillan mitoittava normaalivoima [kN/m]
 d_{tot} on teräsrakenteen yhteenlaskettu korkeus [m]
 L_d on terässillan nurkkien välinen vaakasuora etäisyys [m]

$$V_{db,nurkka} = \frac{8 \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot M_{dj} + \frac{1}{3} \cdot M_{dt} \right] / d_{tot} + |N_d|}{L_{Rs}} \quad \{22\}$$

missä

$V_{db,nurkka}$	on nurkan vahvikelevyn pulteille tuleva leikkausvoima [kN/m ²]
M_{dj}	on lakipisteen murtorajatilan laskennallinen taivutusmomentti [kN·m/m] maan painosta
M_{dt}	on lakipisteen murtorajatilan laskennallinen taivutusmomentti [kN·m/m] liikennekuormasta
N_d	on sillan mitoittava normaalivoima [kN/m]
d_{tot}	on teräsrakenteen yhteenlaskettu korkeus [m]
L_{Rs}	on terässillan nurkkalevyn pituus [m] kaaren suunnassa mitattuna

Vahvistuksien pulttiliitos tarkistetaan kaavojen {23} ja {24} mukaisille väsyttävälle leikkauskuormille.

$$V_{fat} = \frac{8 \cdot |M_t|}{d_{tot} \cdot L_d} \quad \{23\}$$

$$V_{fat,nurkka} = \frac{8 \cdot \left| \frac{1}{3} \cdot M_t \right|}{d_{tot} \cdot L_{Rs}} \quad \{24\}$$

missä

M_t on liikennekuorman aiheuttama momentti [kNm/m]

Vahvikelevyjen pultteihin kohdistuvista leikkausvoimista voidaan vähentää murto- ja väsytystilojen mukaiset pulttiliitoksen kitkavoimat ja mitoittaa liitos leikkaukselle siltä osin kun leikkausvoima ylittää kitkavoiman.

3.10 Putken väsymiskestävyys

3.10.1 Yleistä

Teräsputkisillat mitoitetaan rakenteen väsymiselle eurokoodien SFS-EN 1993-1-9 /6/ ja SFS-EN 1993-2 /7/, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnittelu-perusteet – NCCI 1 /11/* sekä tässä ohjeessa annettujen lisäohjeiden mukaan.

Ehjän levyteräksen väsymisluokka on 160 ja rei'itetyn levyn vastaavasti 90. Väsymismitoitusta ei tarvitse tehdä rei'itetylle teräkselle kun liitoksessa vaikuttava kitkavoima (kaava {25}) ylittää väsyttävien kuormien aiheuttaman pultin vetovoiman arvon.

$$F_{s,Rf} = \frac{k_s \cdot \mu_f \cdot \left(\frac{F_{p,C}}{\gamma_{M3f}} \right)}{\gamma_{M3f}} \quad \{25\}$$

missä

$\mu_f = 0,4$	
$k_s = 0,85$	EN 1993-1-8 taulukko 3.6 /5/
$F_{p,C}$	on pultille tuleva esijännitysvoima [kN]

3.10.2 Tiesillat

Tässä ohjeessa esitetty tieliikenteen teräspankukisiltojen väsymismitoitus perustuu väsytytkuormakaavioon FLM4, kun jännemitta on korkeintaan 8 m. Väsymismitoitus on laskennan yksinkertaistamiseksi muokattu muotoon, jossa käytettävät jännitykset saadaan suoraan kuormakaavion LM2 avulla. Väsytytkuormakaavion FLM4 suurin yksittäinen jännitysvaihteluväli on 40 % kuormakaavion LM2 jännitysvaihteluvälistä. Tämä 40 % osuus on huomioitu esitetyissä λ -kertoimissa.

Teräspankukisiltojen, joiden jännemitta on yli 8 m, väsymismitoitus tehdään väsytytkuormakaavioille FLM3.

Jännitysvaihteluvälin

$$\Delta\sigma = |\sigma_2 - \sigma_1| \quad \{26\}$$

laskennassa huomioidaan puristavan voiman ja momentin yhteisvaikutus. Jännitysvaihteluväli lasketaan erikseen profiilin ala- ja yläpinnassa. Huomioitavaa on myös, että suurin jännitysvaihteluväli saatetaan saavuttaa myös vertaamalla jännityksiä lepotilaan (σ_{max} tai $\sigma_{min} = 0$).

Väsyttävälle kuormille momentin vaihtelu on riippuvainen teräspankukisillan jännemittasta. Väsymismitoitusta varten tieliikennekuorman aiheuttama momentin vaihteluväli lasketaan kaavoilla

$$M_{fat,1} = M_{LM2} \quad \{27\}$$

ja

$$M_{fat,2} = -1 \cdot \left(\frac{D - 2 \cdot m}{12 \cdot m} \right) \cdot M_{LM2} \quad \{28\}$$

missä

D on teräspankukisillan jännemitta [m]
 M_{LM2} on kuormakaavion LM2 aiheuttama taivutusmomentti teräspankukin laella [kNm/m].

Jännitykset profiilin yläpinnassa lasketaan kaavalla

$$\sigma_i = \frac{N}{A} - \frac{M_{fat,i}}{W} \quad \{29\}$$

kun puristavat voimat ja jännitykset ovat negatiivisia ja vastaavasti jännitykset profiilin alapinnassa lasketaan kaavalla

$$\sigma_i = \frac{N}{A} + \frac{M_{fat,i}}{W} \quad \{30\}$$

Tehollinen jännitysvaihteluväli voidaan SFS-EN 1993-1-9 /6/ kuvan 7.4 mukaan määrittää laskemalla yhteen jännitysvaihteluvälin vedetty alue ja 60 % jännitysvaihteluvälin puristetusta alueesta.

Rakenneteräksen väsymiskestävyys tarkistetaan ehdon {31} mukaan, kun Teräspankukin jännemitta on alle 8 m ja redusoitu peitesyvyys on alle 1,5 m.

$$\lambda_{\sigma} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\sigma_{LM2}^5}{\Delta\sigma_D^5} \cdot \frac{N}{5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad \{31\}$$

missä

$$\Delta\sigma_D = 0,737 \frac{\Delta\sigma_C}{Y_{Mf}}$$

$\Delta\sigma_D$ on vakioamplitudinen väsymisraja [MPa]

$\Delta\sigma_C$ on väsymisluokka [MPa]

λ_{σ} on väsyttävän kuorman ja väsymisluokan suhteesta riippuva korjauskertoin $0 \leq \lambda_{\sigma} \leq 1,0$, taulukko 3.3 ja kuva 3.6.

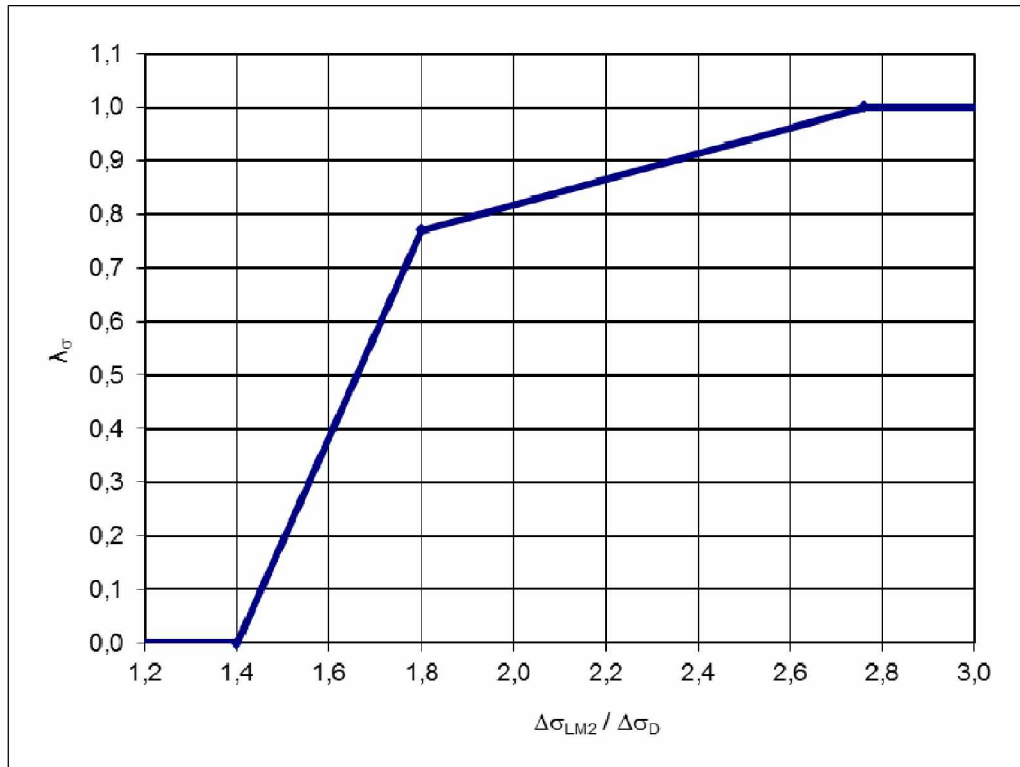
λ_n on peittosyvyydestä ja liikennetyypistä riippuva kerroin, kaavat {32} ja kuva 3.7.

$\Delta\sigma_{LM2}$ kuormakaavion LM2 aiheuttama jännitysvaihteluväli [MPa]

N on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä putkisillalla sen suunnitellunkäyttöään aikana, NCCI 1 /11/ taulukon B4 liikennemäärä kertaa sillan suunniteltu käyttöikä.

Taulukko 3.3 λ_{σ} - ja λ_n -kertoimet

Perusaine			
$\frac{\Delta\sigma_{LM2}}{\Delta\sigma_D}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$
λ_{σ}	0	0,77	1,00
Pulttit			
$\frac{\Delta\sigma_{LM2.b}}{\Delta\sigma_{D.b}}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$
$\lambda_{\sigma.b}$	0	0,77	1,00
$0,737 \cdot \frac{\Delta\tau_{LM2.b}}{\Delta\tau_{C.b}}$	$\leq 1,4$	1,80	$\geq 2,76$
$\lambda_{\tau.b}$	0	0,77	1,00
λ :n väliarvot interpoloidaan			



Kuva 3.6 λ_σ -kerroin

Kerroin λ_n voidaan laskea kaavoilla {32} tai käyttää kuvaa 3.7.

Kaukoliikenne:

$$\lambda_n = (-3,1166 \cdot x^3 + 13,599 \cdot x^2 - 16,612 \cdot x + 11,531) \cdot 10^{-3} \quad \{32a\}$$

Keskipitkä liikenne:

$$\lambda_n = (-2,9122 \cdot x^3 + 12,932 \cdot x^2 - 15,643 \cdot x + 10,902) \cdot 10^{-3} \quad \{32b\}$$

Paikallisiikenne:

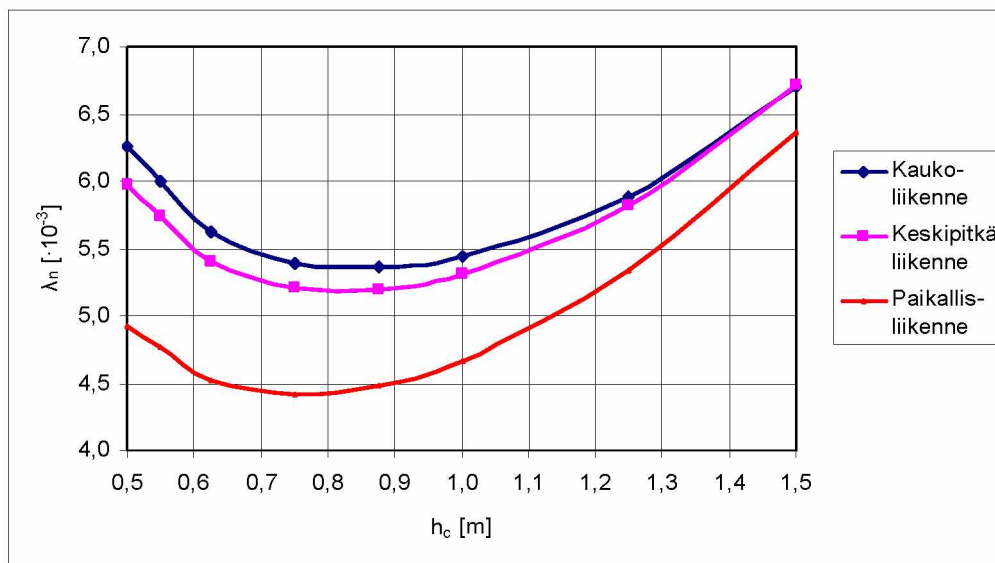
$$\lambda_n = (-2,3782 \cdot x^3 + 11,092 \cdot x^2 - 13,008 \cdot x + 8,943) \cdot 10^{-3} \quad \{32c\}$$

missä

$$x = \frac{h_{c,red}}{m}$$

ja

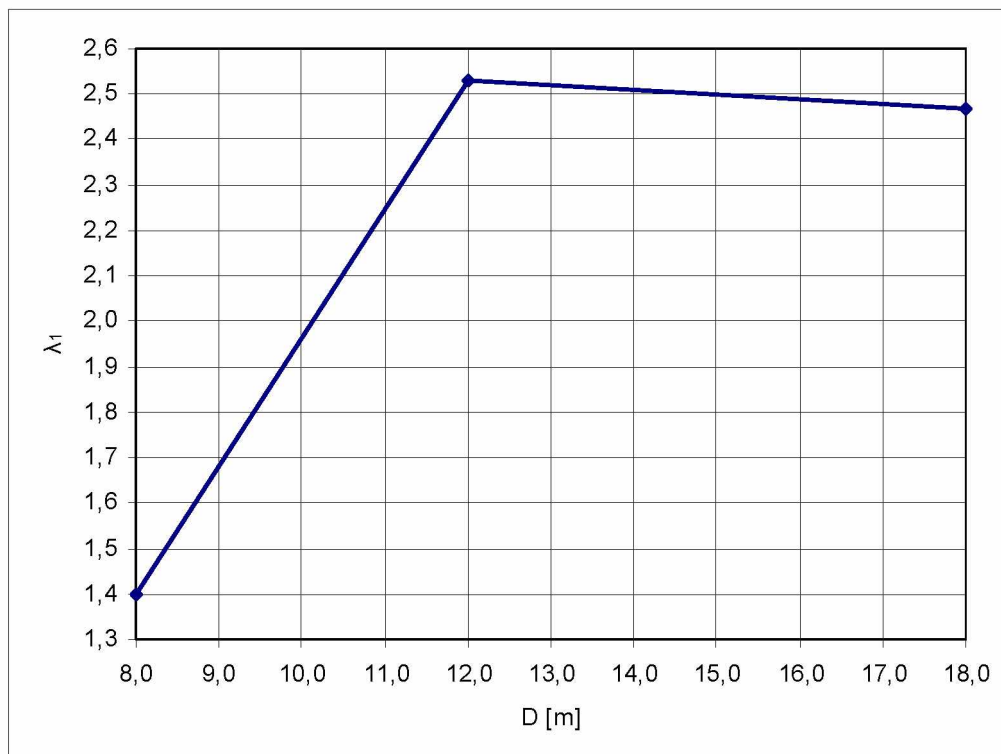
$h_{c,red}$ on teräsputken redusoitu peitesyvyys [m].


 Kuva 3.7 λ_n -kerroin

Peitesyvyys on ollessa enemmän kuin 1,5 m, ei tieliikenteen putkisilloille tarvitse tehdä väsymismitoitusta. Väsymismitoitusta tehdään kuitenkin kaikille putkisilloille, joiden jännemitta on enemmän kuin 8 m, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1 /11/* kuormakaaviolle FLM3. Standardin SFS-EN 1993-2 /7/ kertoimelle λ_1 käytetään kuvan 3.8 tai taulukon 3.4 mukaista muutettua arvoa.

 Taulukko 3.4 λ_1 -kerroin

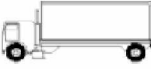




D [m]	8,0	12,0	18,0
λ_1	1,40	2,53	2,47



Kuva 3.8 λ_1 -kerroin

Liikennetyyppi on keskipitkä liikenne, ellei tilaaja ole toisin ilmoittanut. Kerroin λ_n perustuu eurokoodien SFS-EN 1991-2 /3/ FLM4 taulukon 4.7 kuormakaavioihin. Ajoneuvotyyppien jakautuminen on kuitenkin modifioitu Suomessa 1998 tehdyn akseli-massatutkimuksen /1/ perusteella kuvan 3.9 mukaiseksi.

Raskaiden ajoneuvojen lukumäärä N lasketaan eurokoodin soveltamisohje *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 /11/* taulukon B4 avulla käyttäen siltojen elinikänä suunnittelukäyttöikää ellei tilaajan kanssa ole muuta sovittu.

AJONEUVOTYYPPI			LIIKENTEEN TYPPI			
			Kauko- liikenne	Keskipitkä liikenne	Paikallis- liikenne	
KUORMA-AUTO	Akselivälit [m]	Ekvivalentit akseli- kuormat [kN]	Kuorma-autojen osuus			Pyörä- tyyppi
	4.50	70 130	15,0	20,0	35,0	A B
	4.20 1.30	70 120 120	15,0	20,0	35,0	A B B
	3.20 5.00 1.30 1.30	70 150 90 90 90	10,0	10,0	5,0	A B C C C
	3.40 6.00 1.80	70 140 90 90	10,0	10,0	5,0	A B B B
	4.80 3.60 4.40 1.30	70 130 90 80 80	50,0	40,0	20,0	A B C C C

Kuva 3.9 Raskaiden ajoneuvojen jakauma

3.10.3 Rautatiesillat

Rautatiesiltojen väsymiskestävyyden laskelmissa käytetään standardin SFS-EN 1993-2 /7/ taulukon 9.4 sekaliikennetyyppiä 25 t Mix. Vaikutusviivan pituutena käytetään teräsputken jännemittaa D .

Väsymismitoitusta varten raideliikenteen aiheuttama momentin vaihteluväli lasketaan kaavalla {33}.

$$\Delta M_{fat} = 1,5 \cdot |M_{LM71}| \quad \{33\}$$

missä

M_{LM71} on kuormakaavion LM71 ominaisarvon ($\alpha = 1,00$) aiheuttama taivutusmomentti teräsputken laella dynaaminen suurennuskerroin Φ_2 huomioituna.

3.11 Liitosten väsymiskestävyys

3.11.1 Yleistä

Teräsputkisillan liitokset mitoitetaan rakenteen väsymiselle eurokoodien SFS-EN 1993-1-9 /6/ ja SFS-EN 1993-2 /7/, eurokoodin soveltamisohjeen *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 /11/* sekä tässä ohjeessa annettujen lisäohjeiden mukaan.

Pultin väsymisluokka on leikkaukselle mitoitettaessa 100 ja vedolle mitoitettaessa standardin SFS-EN 1993-1-9 /6/ arvosta poiketen 80.

Väsymismitoitusta ei tarvitse tehdä pultin leikkaukselle kun kaavan {25} liitoksessa vaikuttava kitkavoima väsyttävälle kuormalle ylittää väsyttävän leikkausvoiman arvon.

3.11.2 Tiesillat

Tiesilloilla pultteihin kohdistuvasta väsyttävästä leikkausvoimasta voidaan vähentää kitkavoima ja mitoittaa liitos väsyttävälle leikkausvoimalle siltä osin kun leikkausvoima ylittää pulttiliitoksen kitkavoiman.

Tiesilloilla pultin väsymiskestävyys vedolle tarkistetaan kaavan {34} ja leikkaukselle tarkistetaan kaavalla {35} mukaan, kun jännemitta on alle 8 m ja redusoitu peitesyvyys on alle 1,5 m.

$$S_1 = \lambda_{\sigma,b} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\sigma_{LM2,b}^5}{\Delta\sigma_{D,b}^5} \cdot \frac{N}{5 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad \{34\}$$

$$T_1 = \lambda_{\tau,b} \cdot \lambda_n \cdot \frac{\Delta\tau_{LM2,b}^5}{\Delta\tau_{C,d,b}^5} \cdot \frac{N}{2 \cdot 10^6} \leq 1,0 \quad \{35\}$$

missä

$$\Delta\sigma_{D,b} = 0,737 \frac{\Delta\sigma_{C,b}}{Y_{Mf}}$$

$$\Delta\tau_{C,d,b} = \frac{\Delta\tau_{C,b}}{Y_{Mf}}$$

$\Delta\sigma_{C,b}$	on väsymisluokka pultin vedolle [MPa]
$\Delta\tau_{C,b}$	on väsymisluokka pultin leikkaukselle [MPa]
$\lambda_{\sigma,b}$	on väsyttävän kuorman ja väsymisluokan suhteesta riippuva korjauskertoin $0 < \lambda_{\sigma,b} < 1,0$, taulukko 3.3
$\lambda_{\tau,b}$	on väsyttävän kuorman ja väsymiskestävyys suhteesta riippuva korjauskertoin $0 < \lambda_{\tau,b} < 1,0$, taulukko 3.3
λ_n	on peittösyvyydestä ja liikennetyypistä riippuva kerroin, kaavat {32} tai kuva 3.7.
$\Delta\sigma_{LM2,b}$	on kuormakaavion LM2 aiheuttama pulttien vedon jännitys vaihteluväli [MPa]
$\Delta\tau_{LM2,b}$	on kuormakaavion LM2 aiheuttama pulttien leikkauksen jännitys vaihteluväli [MPa]
Y_{Mf}	on osavarmuusluku taulukon 3.2 mukaan
N	on raskaiden ajoneuvojen kokonaismäärä putkisillalla sen suunnitellunkäyttöä aikana, NCCI 1 /11/ taulukon B4 liikennemäärä kertaa sillan suunniteltu käyttöikä.

Mikäli liitos on mitoitettava samanaikaiselle vedolle ja leikkaukselle tulee kaavan {36} ehdon täyttyä.

$$S_1 + T_1 \leq 1,0 \quad \{36\}$$

Väsymistä laskettaessa muualla kuin putken lakipisteessä taivutusmomentin suurinta arvoa voidaan redusoida peitesyvyyden paksuuden lisääntyessä tai sivupeltien alueella ruotsalaisen ohjeen /2/ mukaisesti. Mikäli pulttiliitos sijaitsee laki- ja sivupellin rajapinnassa, taivutusmomenttina voidaan käyttää alueiden maksimimomenttien itseisarvojen keskiarvoa.

3.11.3 Rautatiesillat

Rautatiesilloilla pultin väsymiskestävyys tarkistetaan vedolle, leikkaukselle ja niiden yhteisvaikutukselle.

Rautatiesilloilla ei käytetä liitoksen kitkavoimaa hyväksi väsymisessä.

3.12 Käyttöikämitoitus

3.12.1 Yleistä

Käyttöikämitoituksella pyritään varmistamaan putken säilyvyys suunnittelukäyttöiän tai erikseen asetetun tavoiteikäkäyttöiän saavuttamiseksi.

Teräsputken ja sen eri osien käyttöolosuhteet selvitetään ja niiden perusteella määritetään tarvittavat lisäsuojaustoimenpiteet, joilla tavoitteena oleva käyttöikä saavutetaan. Selvityksessä käytetään hyväksi olosuhdeluokitusta ja mitoitus tehdään kohdan 3.12.6 mukaisesti. Menettelyn avulla lasketut käyttöiät eivät ole tarkkoja mutta ne osoittavat käyttöiän suuruusluokan ja niitä voidaan käyttää eri vaihtoehtojen vertailussa.

3.12.2 Veden laadun vaikutus

Veden laadulla ja jatkuvalla virtausnopeudella on ratkaiseva merkitys putkityypin ja lisäsuojauksen valinnassa. Ilman lisäsuojausta teräsputken korroosio voi tietyissä olosuhteissa olla nopeaa.

Korroosio vedessä riippuu useista eri tekijöistä. Vesi voi sisältää syövyttäviä aineita joko liuenneena tai hiukkasina. Virtaava vesi ja siinä olevat maa-ainekset aiheuttavat putken suojauskerrosten kulumista.

Suunnittelun lähtötiedoiksi ja olosuhdeluokan määrittämiseksi tarvitaan veden pH-arvo ja virtausnopeus. Veden pH-arvo on mitattava siltapaikkatutkimuksissa. Vanhaa putkisiltaa uusittaessa voidaan käyttää Siltarekisterin tarkastustiedoissa olevaa pH-arvoa, jos sen päivitys on enintään 5 vuotta vanha. Mitoitusvirtausnopeus lasketaan uoman keskiylivirtaamasta, jonka arvo saadaan Ympäristökeskuksen aukkolausunossa mainitusta ylivirtaamasta (HQ20) ja vastaavasta uoman poikkipinta-alasta vedenkorkeudella HW20 kertomalla näin saatu virtausnopeus luvulla 0,65.

3.12.3 Olosuhdeluokat

Putken eri osat luokitellaan käyttöolosuhteiden perusteella olosuhdeluokkiin 1–4. Olosuhdeluokat on aina ilmoitettava suunnitelmassa.

Olosuhdekerroin k_i ($i = 1-4$) liittyy olosuhdeluokkaan ja ilmoittaa putken ja sen suoja-kerrosten kulumisnopeuden olosuhdeluokkaan 1 verrattuna.

Mitoitusvirtausnopeutena olosuhdeluokissa käytetään keskimäärin kahden vuoden aikana uomassa esiintyvää keskimääräistä virtausnopeutta v_{HW} [m/s] yliveden HW tai ylivirtaaman HQ aikana.

Putken eri osat kuuluvat olosuhdeluokkiin 1–4 seuraavasti:

Olosuhdeluokka 1, olosuhdekerroin $k_1 = 1$

Alikulkukäytävä tai alikäytävä, kun yli- ja alikulkevaa tietä kumpaakaan ei suolata:

- Koko putki lukuun ottamatta putken sisäpuolen reunaosia 0,5 metrin korkeudelta maanpinnan ylä- ja alapuolella

Vesistösilta:

- putken sisäpuolen yläosa 0,5 m keskivedenpinnan (MW) yläpuolelta
- putken ulkopuoli, kun ylikulkevaa tietä ei suolata

Olosuhdeluokka 2, olosuhdekerroin $k_2 = 1,5$

Alikulkukäytävä:

- putken sisäpuolen reunaosat 0,5 metrin korkeudelta maanpinnan ylä- ja alapuolella

Alikulkukäytävä tai alikäytävä, kun alikulkevaa tietä suolataan tai putki toimii karjattunnelina:

- putken sisäpuolen alaosa, ulottuen 0,5 m maanpinnan yläpuolelle.

Alikulkukäytävä ja vesistösilta, kun ylikulkevaa tietä suolataan eikä ympäristäytöön putken päälle ole rakennettu vedenpitävää suojausta:

- putken ulkopuoli kokonaan

Olosuhdeluokka 3, olosuhdekerroin $k_3 = 2,5$

Vesistösilta:

- putken sisäpuolen alaosa ulottuen 0,5 m keskivedenpinnan (MW) yläpuolelle, kun
 - veden pH on > 4 tai
 - lievästi hiova virtaus, hiekkapohja
 - mitoitusvirtausnopeus $< 1,5$ m/s ja $< 1,2 + \ln(h_{HW})/4$ [m/s], jossa h_{HW} on vastaava vedensyvyys [m]

Olosuhdeluokka 4, olosuhdekerroin $k_4 = 4$

Vesistösilta:

- putken sisäpuolen alaosa ulottuen 0,5 m keskivedenpinnan (MW) yläpuolelle, kun
 - veden pH on 3–4 tai
 - kohtuullisen hiova virtaus, hiekka- tai sorapohja
 - mitoitusvirtausnopeus $< 4,5$ m/s ja $< 3,1 + \ln(h_{HW})$ [m/s], jossa h_{HW} on vastaava vedensyvyys [m].

Olosuhdeluokitusta ei käytetä, vaan kohde suunnitellaan erikoistapauksena, kun

- veden pH on < 3 tai
- virtausnopeus > 4,5 m/s.

3.12.4 Teräsputken käyttöikään vaikuttavat tekijät

Teräsputken kestävyys korroosiota vastaan vaikuttavat levypaksuus, sinkitys ja lisäsuojaus.

Levypaksuus

Rakenteen säilyvyyteen ja muodonmuutosten välttämiseen perustuvat teräslevyn minimiainepaksuudet on esitetty kohdassa 3.1.

Käyttöikälaskelmissa voidaan elinkaaren lopussa sallia teräsprofiilin paksuuteen 20 % ruostumisesta johtuva syöpymisvara. Elinkaaren loppuvaiheessa ympärystytöt ovat tiivistyneet teräsputkisillan käyttöönoton aikaisista arvoista, joten ohuempikin ainevahvuus riittää putkessa. Levypaksuuden syöpymisvara voi olla erilainen putken sisä- ja ulkopuolella, kunhan yhteenlaskettu syöpymisvara ei ylitä 20 %. Esimerkiksi, jos käytetään putken sisäpuolella 15 % ja ulkopuolella 5 % syöpymisvarasta, levypaksuuden osuus T1 putken sisäpuolen käyttöiässä on 0,15-levypaksuus jaettuna syöpymisnopeudella ja sisäpuolen käyttöiässä 0,05-levypaksuus jaettuna syöpymisnopeudella. Suurentamalla staattisella mitoituksella saatua levypaksuutta voidaan putken mitoitusikä lisätä, joskin keino on kallis ja tehoton.

Käyttöikämitoituksessa käytettävät teräsputken levypaksuuden syöpymisnopeudet eri olosuhdeluokissa on esitetty taulukossa 3.5.

Sinkitys

Sinkkikerroksen paksuutena käyttöikälaskelmissa käytetään taulukoiden 2.1 ja 2.2 keskimääräisen kerrospaksuuden arvoja. Sinkkikerroksen kestoajan osuus T2 putken käyttöiässä on sinkkikerroksen paksuus jaettuna syöpymisnopeudella.

Käyttöikämitoituksessa käytettävät sinkkikerroksen syöpymisnopeudet eri olosuhdeluokissa on esitetty taulukossa 3.5. Alumiinisinkkikerros syöpyy vain 30 % sinkkikerroksen arvoista.

Lisäsuojaus maalaamalla tai pinnoittamalla

Sinkityksen ja epoksimaalauksen muodostama yhdistelmäpinnoitus on kestoältään 1,5-kertainen verrattuna osakerrosten yhteenlaskettuun kestoikään erillisinä kerroksina. Lisäsuojauksen kestoajan osuus T3 putken käyttöiässä on suojauksen kerrospaksuus jaettuna kulumisnopeudella.

Käyttöikämitoituksessa käytettävät maalausjärjestelmillä sekä muulla polymeeripinnoitteella tehtyjen lisäsuojauksen kulumisnopeudet eri olosuhdeluokissa on esitetty taulukossa 3.5.

Taulukko 3.5 Käyttöikämitoituksessa käytettävät syöpymis- ja kulumisnopeudet eri olosuhdeluokissa, $\mu\text{m}/\text{v}$.

	Olosuhdeluokka			
Materiaali	1	2	3	4
Levyypaksuus	30	45	75	120
Sinkitys	2	3	5	8
Epoksipiki- tai epoksitervamaali	4	6	10	15
Hartsimodifioitu epoksimaali	3	5	8	12
Muu polymeeri-pinnoite	2,5	3,5	6	9,5

3.12.5 Lisäsuojaus

Teräspuutken lisäsuojauksa tarvitaan sinkkipinnoitteen lisäksi vaativissa olosuhteissa ja erityisesti vesistöpuutken alaosaissa, jossa vedenkorkeuden vaihtelualue on vaurioitumisherkkin. Lisäsuojauksa tarvitaan yleensä, kun

- veden virtaus on voimakasta
- veden pH on alhainen
- putki asennetaan veteen ja täyttömateriaali on murskattua kiviainesta
- veneily tai muu liikenne saattaa aiheuttaa sinkitykseen vaurioita
- putken pääasiallinen käyttötarkoitus on karjatunneli
- ulkonäköseikoille asetetaan erityisiä vaatimuksia.

Lisäsuojausmenetelmänä tulevat kyseeseen

- maalaus
- muu polymeeripinnoitus
- suodatinkangas
- ruiskubetonointi
- katodinen suojaus.

Sinkin ja maalauksen muodostaman yhdistelmäpinnoitteen kestoikä on pitempi kuin sinkki- ja maalikerrosten yhteenlasketut kestoajat. Lisäsuojauksen käyttöikää lisäävä vaikutus lasketaan käyttöikämitoituksessa (kohta 3.12.6).

Maalaus- pinnoitustyössä sekä pintakäsittelysuunnitelman laatimisessa noudatetaan soveltuvien osin InfraRYL:n /13/ luvun 42050 ja SILKO-ohjeen 2.354 /28/ laatuvaatimuksia ja ohjeita.

Maalausjärjestelmät ja pinnoitus

Olosuhdeluokassa 1 lisäsuojauksa ei yleensä tarvita vaan sinkitys on riittävä korroosiosuoja. Jos alikulkukäytävän näkyvään sisäpintaan halutaan tehdä lisäsuojaus ulkonäkösyistä, voidaan käyttää modifioitu-epoksi (R) EP tai epoksi-polyuretaani EPPUR maalausjärjestelmää, jolloin värisävyjä on valittavissa runsaasti.

Olosuhdeluokissa 1–3 käytettäviä lisäsuojausmenetelmiä ovat

- hartsimodifioitu epoksimaali (R)EP 100/2-400/4 FeZnSaS (\approx TIEL 4.4)
- epoksi-polyuretaanimaali EPPUR 100/2-400/4 FeZnSaS (\approx TIEL 4.20)
- muu polymeeripinnoitus $\geq 250 \mu\text{m}$.

Olosuhdeluokassa 4 käytettäviä lisäsuojausmenetelmiä ovat

- hartsimodifioitu epoksimaali (R)EP 300/3-400/4 FeZnSaS (\approx TIEL 4.4)
- epoksinpinoitus EP 400/1-FeZnSaS.
- muu polymeeripinnoitus $\geq 250 \mu\text{m}$ (ks. kohta 2.8.4).

Pinnoitepaksuudet valitaan maalinalmistajien tuote- ja käyttöselosteitten mukaan. Esimerkkejä maalivalmistajien tällä hetkellä voimassa olevista maaliyhdistelmistä ovat:

Tikkurila	Kuivakalvo
TEMACOAT RM40	80-125 μm

Teknos	
TEKNOPLAST HS 150	80-150 μm

Nor-maali	
EPOTEX HB	80-200 μm

Suodatinkangasta käytetään putken ulkopuolen sinkityksen ja lisäsuojauksen suojaamiseen rakentamisen aikana syntyviltä vaurioilta sekä tie- että rautatiesilloilla. Suodatinkankaan käyttöluokan tulee olla N3.

Ruiskubetonointia voidaan käyttää vesistöputkien pohjalevyjen suojaamiseen voimakkaan virtauksen aiheuttamaa kulumista vastaan. Yleensä ruiskubetonointia käytetään vain käyttöiän jatkamiseksi tarkoitettuna korjausmenetelmänä /27/.

Katodinen suojaus on mahdollinen vaihtoehto lisäsuojaukseksi olosuhdeluokissa 3 ja 4. Suojausta varten tarvitaan erikoisasiantuntijan tekemä siltakohtainen suunnitelma ja jatkuva huoltosopimus. Yleensä katodinen suojaus tulee harkittavaksi vain käyttöiän jatkamiseksi tarkoitettuna korjausmenetelmänä.

3.12.6 Yksinkertaistettu käyttöikämitoitus

Käyttöikämitoitus tehdään erikseen kuhunkin olosuhdeluokkaan kuuluville putken osille.

1. Määritetään putken eri rasitusolosuhteissa olevien osien olosuhdeluokat (1, 2, 3 tai 4).
2. Lasketaan putken mitoitusikä KI seuraavista kaavoista:

a) sinkitty putki ilman lisäsuojauksia
 $KI = T_1 + T_2$

b) sinkitty putki lisäsuojattuna
 $KI = T_1 + 1,5 \cdot (T_2 + T_3)$

- joissa T_1 = levypaksuuden osuus mitoituskäyttöiässä
 T_2 = sinkityskerroksen kestoikä
 T_3 = lisäsuojauksen kestoikä

Kestoikien T_1 , T_2 ja T_3 laskennassa tarvittavat tiedot ovat kohdassa 3.12.4.

3. Verrataan mitoituskäyttöikää suunnittelukäyttöikään tai asetettuun tavoitekäyttöikään ja sovitetaan osatekijät sellaisiksi, että mitoituskäyttöikä ylittää sen.

Tällä menettelyllä laskettu käyttöikä ei ole tarkka, joten verrattaessa laskettua mitoituskäyttöikää tavoitekäyttöikään sallitaan toleranssi -2 vuotta.

Esimerkki 1: Alikulkukäytävä, yli- ja alikulkevaa tietä kumppaakaan ei suolata. Levypaksuus 3,50 mm, sinkityksen paksuus 70 µm. Suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

Ulkopuoli ja sisäpuolen ylä- ja alaosa, olosuhdeluokka 1:

- $KI = T_1 + T_2 = 0,13 \cdot 3500 \text{ µm} / 30 \text{ µm} + 70 \text{ µm} / 2 \text{ µm} = 15,2 + 35,0 = 50,2 \text{ v}$, joka täyttää vaatimuksen 50 v.

Sisäpuolen reunaosat, olosuhdeluokka 2:

- $KI = T_1 + T_2 = 0,07 \cdot 3500 \text{ µm} / 45 \text{ µm} + 70 \text{ µm} / 3 \text{ µm} = 5,4 + 23,3 = 28,7 \text{ v}$, joka on < 50 v.

→ Lisäsuojaus, epoksipikimaali 120 µm, jolloin:

- $KI = T_1 + 1,5 \cdot (T_2 + T_3) = 0,07 \cdot 3500 \text{ µm} / 45 \text{ µm} + 1,5 \cdot (70 \text{ µm} / 3 \text{ µm} + 120 \text{ µm} / 6 \text{ µm}) = 5,4 + 1,5 \cdot (23,3 + 20,0) = 70,4 \text{ v}$, joka on > 50 v.

Esimerkki 2: Vesistöputki, ylikulkevaa tietä suolataan, veden pH 3,5, virtausnopeus 2,5 m/s. Levypaksuus 3,50 mm, sinkityksen paksuus 70 µm. Suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

Sisäpuolen alaosa, olosuhdeluokka 4:

- $KI = T_1 + T_2 = 0,20 \cdot 3500 \text{ µm} / 120 \text{ µm} + 70 \text{ µm} / 8 \text{ µm} = 5,8 + 8,8 = 14,6 \text{ v}$, joka on < 50 v.

→ Lisäsuojaus, hartsimodifioitu epoksimaali 240 µm, jolloin:

- $KI = T_1 + 1,5 \cdot (T_2 + T_3) = 0,20 \cdot 3500 \text{ µm} / 120 \text{ µm} + 1,5 \cdot (70 \text{ µm} / 8 \text{ µm} + 240 \text{ µm} / 12 \text{ µm}) = 5,8 + 1,5 \cdot (8,8 + 20,0) = 49,0 \text{ v}$, joka on sallitun toleranssin perusteella hyväksyttävä (50-2 v).

Sisäpuolen yläosa, olosuhdeluokka 1:

- $KI = T_1 + T_2 = 0,20 \cdot 3500 \text{ µm} / 30 \text{ µm} + 70 \text{ µm} / 2 \text{ µm} = 23,3 + 35,0 = 58,3 \text{ v}$, joka on > 50 v.

Ulkopuoli, olosuhdeluokka 2:

- $KI = T_1 + T_2 = 0,0 \cdot 3500 \text{ µm} / 45 \text{ µm} + 70 \text{ µm} / 3 \text{ µm} = 0,0 + 23,3 = 23,3 \text{ v}$, joka on < 50 v.

→ Lisäsuojaus, epoksipikimaali 120 µm, jolloin:

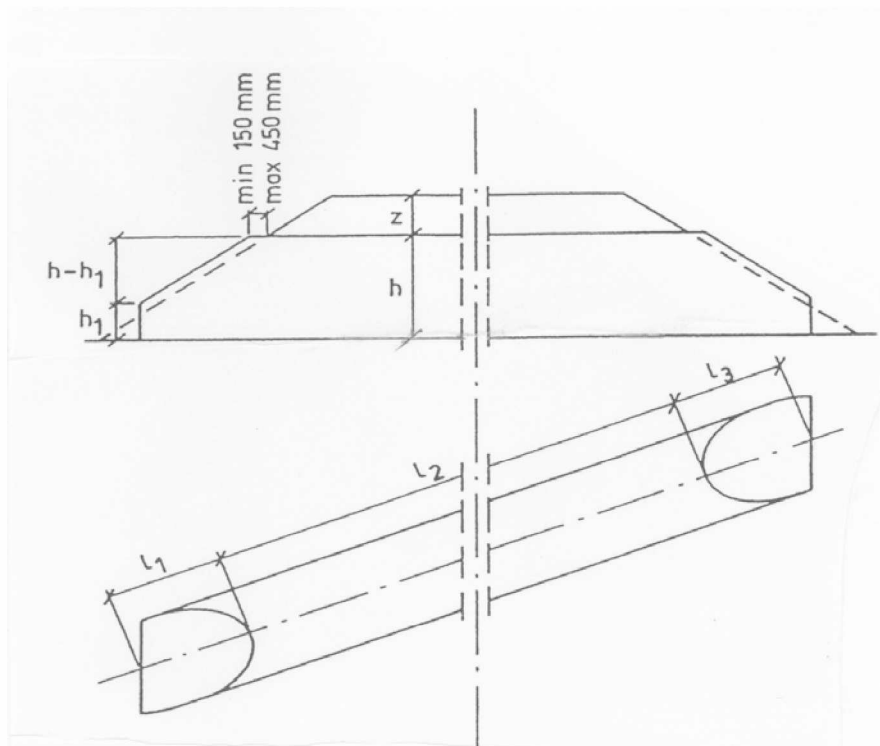
$KI = T_1 + 1,5 \cdot (T_2 + T_3) = 0,0 \cdot 3500 \text{ µm} / 45 \text{ µm} + 1,5 \cdot (70 \text{ µm} / 3 \text{ µm} + 120 \text{ µm} / 6 \text{ µm}) = 0,0 + 1,5 \cdot (23,3 + 20,0) = 65,0 \text{ v}$, joka on > 50 v.

4 Muu suunnittelu

4.1 Putken viiste ja suuntakulma

Putken päät viistetään yleensä luiskan kaltevuuteen. Viiste aloitetaan määräkorkeudesta, joka on kolmasosa putken korkeudesta. Tämä vastaa matalarakenteisilla putkilla alanurkkalevyn yläreunan korkeutta. Viistesuhde määritetään kuvassa 4.1 esitetyllä tavalla. Putken päiden viistämisessä on otettava huomioon myös putken suuntakulma.

Putken viisteosan taipuma sisäänpäin ei saa aiheuttaa sillan vapaan aukon alituksia eikä poikkileikkauksen kaventumista enempää kuin $D/150$. Loivissa luiskissa putken viistettyä osaa joudutaan vahvistamaan lisäjäykisteellä. Myös raudoitettun maan käyttö viisteeseen tulevien maanpaineiden pienentämiseksi voi tulla kysymykseen käyttöikämitoitus huomioon ottaen.



Kuva 4.1 Putken pituuden ja viistesuhteen määrittäminen

Kuvan 4.1 mukaisen putken pituudet ja viisteet lasketaan seuraavasti:

Pituus:

- alapituus = $l_1 + l_2 + l_3$
- lakipituus = l_2

Huom. Tarkastettava, että $l_2 \geq l_1 + l_3$

Viiste:

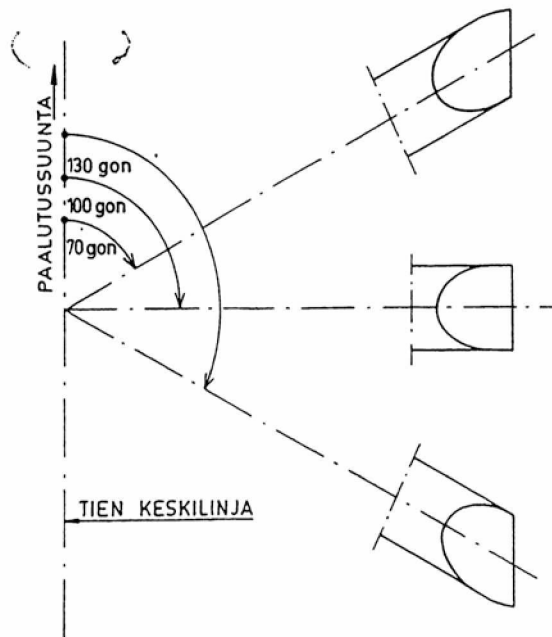
- viiſteen alkamiskorkeus $h_1 = h/3$
- viistesuhde $= (h - h_1) / l_1$
- z = peitesyvyys

Putki pyritään ensisijaisesti sijoittamaan kohtisuoraan tien alitse. Putki voidaan sijoittaa tien keskilinjaan nähden vinoon, jos

- putki asennetaan uomaan, jota ei ole tarkoituksenmukaista siirtää
- alittavan tien linjaus edellyttää vinoa risteämistä
- putki saadaan näin kokonaisuudessaan kantavan pohjamaan varaan.

Vinoon sijoitetun putken pää voi olla tien suuntainen (kuva 4.2) tai siitä poikkeava, myös kohtisuora.

Tiesilloissa suuntakulman suositusarvot ovat välillä 70 - 130 gon (kuva 4.2). Rautatie-silta tulee sijoittaa kohtisuoraan radan alitse.



Kuva 4.2 Suuntakulma

4.2 Putken pituus

Putken pituudella voidaan tarkoittaa sekä putken laen keskilinjan pituutta (lakipituus) että putken pohjan keskilinjan pituutta (alapituus) (kuva 4.3). Siltarekisteriin kirjataan vain lakipituus.

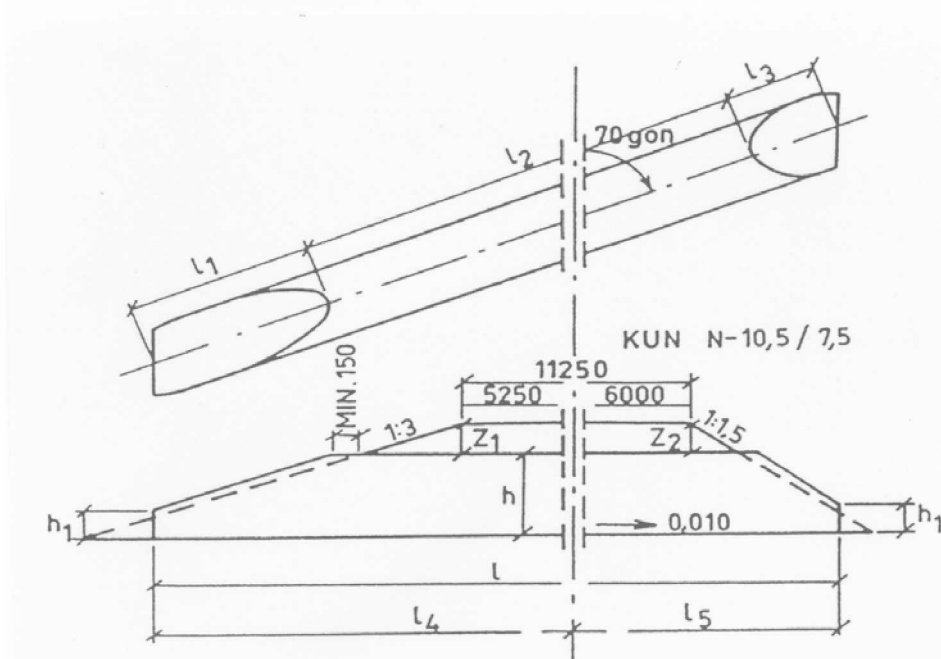
Putken lakipituus määräytyy tien poikkileikkauksen ja peitesyvyyden perusteella. Jos putken pää on viistetty, putken yläpinnan on ulotuttava vähintään 150 mm ja enintään

450 mm tieluiskan ulkopuolelle. Rataluiskien leveydessä huomioidaan raiteen nosto (200 mm).

Putken alapituus määritetään viistetyissä putkissa lakipituuden, luiskan kaltevuuden, viisteen alkamiskorkeuden ja suuntakulman perusteella (kuva 4.2). Alapituutta voidaan kasvattaa lasketusta pituudesta siten, että putken suuntainen levyjako menee tasan, kuitenkin enintään 600 mm / pääty.

Jos putken pää on suora, putken pituus määritetään yleensä siten, että noin kolmasosa putken korkeudesta jää tieluiskan sisään. Jos putki on tätä lyhyempi, putken pääte on tuettava kovalla verhouksella tai tukimuurilla.

Putken pituutta määritettäessä myös ulkonäköseikat on otettava huomioon. Suora pää ei yleensä ole esteettinen.



Kuva 4.3 Putken pituuden määrittäminen, esimerkki

Kuvan 4.3 lähtötiedoilla voidaan määrittää putken mitat.

Putki: pituuskaltevuus 1 %, peitesyvyyydet: $z_1 = 600$, $z_2 = 720$, korkeus $h = 1800$, viisteen alkamiskorkeus $h_1 = 600$.

Lakipituus: Määritetään tien poikkileikkauksen, suuntakulman ja peitesyvyyden perusteella, lisättynä minimiylityksellä 2·150 mm. Kun suuntakulma on 70 gon, vinoudesta aiheutuva pidentymäkerroin on $1/\sin(70\text{gon}) = 1,12$.

$$l_2 = (11250 + 3 \cdot 600 + 1,5 \cdot 720 + 2 \cdot 150) \cdot 1,12 = 16160.$$

Alapituus: Määritetään lakipituuden ja viisteiden perusteella.

$$l = l_2 + l_1 + l_3 = 16160 + (3 \cdot 1200 + 1,5 \cdot 1200) \cdot 1,12 = 22210.$$

Lisäksi määritetään pituudet l_4 ja l_5 : $l_4 = 12095$, $l_5 = 10115$.

4.3 Vierekkäiset putket

Jos rajoitetun pengerkorkeuden tai muiden syiden takia käytetään vierekkäisiä putkia, putkien välisen etäisyyden on oltava vähintään taulukon 4.1 mukainen riittävän maan sivupaineen kehittymiseksi putkien välissä.

Taulukko 4.1 Vierekkäisten putkien vähimmäisetäisyys

Teräsputkisillat	Vähimmäisetäisyys
$D \leq 10 \text{ m}$	1,0 m
$D > 10 \text{ m}$	$D / 10$
Teräsholvisillat	Vähimmäisetäisyys
$D \leq 6 \text{ m}$	0,6 m
$D > 6 \text{ m}$	$D / 10$

4.4 Perustaminen

4.4.1 Yleistä

Teräsputkisillan perustaminen suunnitellaan ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu /35/* mukaan, niin että ne täyttävät standardin SFS-EN 1997-1 /8/, kansallisessa liitteessä sekä soveltamisohjeessa *Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 /10/* esitetyt vaatimukset. Roudan vaikutus otetaan huomioon saman suunnitteluohjeen mukaisesti. Suunnittelu on tehtävä siten, että

- maapohjan ja rakenteen varmuudet murtumista vastaan ovat riittävän suuret sekä rakennusaikana että rakenteen käyttöaikana
- rakenteen painumat, siirtymät, kiertymät ja muodonmuutokset pysyvät niin pieninä, etteivät ne haittaa rakenteen käyttöä eivätkä niiden aiheuttamat rasitukset kasva liian suuriksi
- rakentamisen vaikutus pohjaveteen ja rakentamisen vaatimien täyttöjen vaikutus otetaan huomioon.

Teräsputkisilta perustetaan aina kaivannon pohjalle tai yhtenäisen paalulaatan päälle sorasta tai murskeesta rakennettavan tiivistetyn alustäytön varaan. Alustäyttö on muotoiltava vastaamaan putkisillan pohjan muotoa. Muotoilun täytön tulee ulottua tasolle, jonka yläpuolella täyttöä ja tiivistystä voidaan tehdä tavanomaisilla menetelmillä. Muotoillun alustäytön taso esitetään sillan yleispiirustuksessa.

Jos teräsputkisilta perustetaan vanhan peruslaatan tai kovan arinan päälle, on putkisillan alustäyttö suunniteltava ja rakennettava niin, että sen jäykkyys on koko putken alueella likimain samanlainen. Teräsholvisillan teräsbetonianturat voidaan perustaa ympärystäytön toiminta huomioon ottaen myös suoraan paalujen varaan.

Alustäyttö on ulotettava putken pituussuunnassa vähintään paksuutensa verran putken päiden ulkopuolelle. Alustäytön paksuus suunnitellaan tapauskohtaisesti ottaen

huomioon pohjamaan kantavuus ja routasuojaustarve ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu* /35/ mukaisesti. Vähimmäispaksuus on 300 mm. Alustäytön alaosaan tehdään tarvittaessa 100 - 200 mm paksuinen suodatinkerros tai käytetään suodatin-kangasta. Alustäyttöä ei kuivateta alikulkukäytävää rakennettaessa.

Teräsputkisiltojen suunnittelussa on lisäksi otettava erityisesti huomioon

- tulopenkereiden liittyminen viereisiin tie- ja pohjarakenteisiin
- kuivatuksen kokonaisjärjestelyt
- veden luonnollinen virtaus vesistöissä
- alikulkevan tien tarkoituksenmukainen sijainti liikenteen kannalta.

Sillan tulopenkereet suunnitellaan ohjeen Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet /23/ mukaan. Ohjeessa on esitetty vaatimukset muun muassa vakavuudelle ja sallitulle painumalle.

4.4.2 Sillan painuma

Teräsputkisillan ja teräsholvisillan alusrakenteiden sallitun painuman, kiertymän tai painumaeron määrittää aina suunnittelija. Sillan painuman arvioinnissa huomioidaan mm.

- tiepenkereestä ja muista maarakenteista muodostuva pohjamaan lisäkuormitus
- sillan ympäristäytöstä muodostuva pohjamaan lisäkuormitus
- pohjaveden pinnan aleneminen.

Putkisillat suunnitellaan siten, että painumisesta ei ole haittaa liikenteelle. Tien pinnan painuman raja-arvot on esitytetty ohjeessa Teiden pohjarakenteiden suunnittelu-perusteet TIEH 2100002-01,. Rautateitä koskevat vaatimukset on esitetty ohjeessa RATO 3 Radan rakenne.

Teräsputkisillan keskikohta painuu homogeenisissa pohjaolosuhteissa pengerkuorman vaikutuksesta enemmän kuin putken päät. Tasaisessa koko putken pituudella tapahtuvassa putken taipumassa taipuneen putken taivutussäteen pitää olla $\geq 200 \cdot H_k$ (H_k on putken kokonaiskorkeus). Eri putkipituuksille laskettuja sallittuja taipuma-arvoja on taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Teräsputken sallitut taipumat

Putken alapinnan pituus (m)	Sallittu taipuma (mm)
10	$60 / H_k$
15	$140 / H_k$
20	$250 / H_k$
30	$560 / H_k$
60	$1250 / H_k$
H_k = putken kokonaiskorkeus (m).	
Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti.	

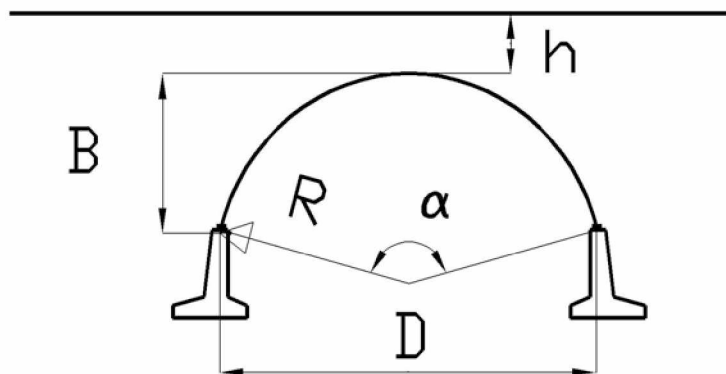
Putken tasaista painumaa voidaan kompensoida esikoroituksella, joka saa olla enintään 50 % lasketusta taipumasta. Korotuksen suuruus ei saa ylittää putken valmistajan sallimaa enimmäiskorotusta.

Putken pituussuuntainen paikallinen painumaero saa olla enintään $H_k / 250$. Painumaeroa tarkastettaessa mittausvälin tulee olla $\leq 2 \cdot H_k$.

Putken pituusakseliin nähden poikittainen painumaero saa aiheuttaa enintään 1 ‰:n kallistuman.

4.4.3 Teräsholvisillan perustukset

Teräsholvisilta tuetaan perustuksiin kiinnitettyihin U-muotoisiin teräsprofiileihin siten, että tuentaan ei tule taivutusta. Tukipisteeseen tuleva normaalivoima voidaan laskea ruotsalaisen mitoitusohjeen mukaan $/2/$.

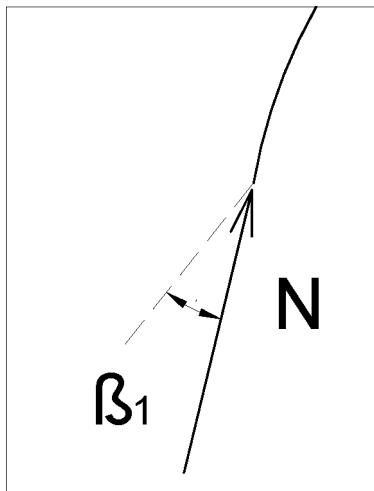


Kuva 4.4 Teräsholvisillan olennaiset mitat

Ellei muita hyväksyttäviä laskelmia tehdä, sillan perustukset tulee mitoittaa laskelmista saatavalle normaalivoimalle ottaen huomioon kussakin kuormitustapauksessa normaalivoiman suunta-poikkeama β_t tangentin suunnasta (taulukko 4.3).

Taulukon 4.3 arvoja voidaan soveltaa vain teräsholvisilloille, joiden poikkileikkaus on ympyränmuotoinen, kaaren kulma välillä $\alpha = 150\text{--}180^\circ$, kaaren säde välillä $R = 2\text{--}3\text{ m}$ ja aallon korkeus $50\text{--}160\text{ mm}$.

Taulukossa 4.3 annettujen arvojen h ja R väliin sattuvat β_t arvot voidaan interpoloida lineaarisesti.



Kuva 4.5 Teräsholvisillan tukireaktiot.

Taulukko 4.3 Normaaliveiman suuntaoikkeamat

		R = 2 m	R = 3 m
Kuormitustapaus	h	β_1	β_1
Maanpaine	0,5	0,5	0,3
Pelkkä liikenne		7,5	4,0
Liikenne + maanpaine		4,5	3,5
Liikenne + maanp. + jarru		8,5	5,0
Maanpaine	1,0	3,0	2,0
Pelkkä liikenne		6,0	5,0
Liikenne + maanpaine		4,0	3,5
Liikenne + maanp. + jarru		6,0	5,2
Maanpaine	2,0	3,0	2,5
Pelkkä liikenne		5,5	6,0
Liikenne + maanpaine		4,0	3,0
Liikenne + maanp. + jarru		6,0	3,5
Maanpaine	5,0	3,5	3,0
Pelkkä liikenne		4,5	3,5
Liikenne + maanpaine		4,0	3,0
Liikenne + maanp. + jarru		4,0	3,0

Taulukko 4.3 on laskettu kuormalle LM1. Mikäli kuorma LM2 on määrävä, kuormitustapauksista N_{\max} vastaavaa β_1 :n arvoa on korotettava 30 %. Putkisillan perustuksia ei tarvitse tarkastaa LM3 kuormalle. Rautatiesiltojen suunnitteluun taulukkoa 4.3 ei pidä soveltaa.

Perustusta mitoitettaessa otetaan huomioon ennakoitujen painumat perustuksen piti-
tuussuunnassa. Perustuksen vakavuus on suunniteltava siten, ettei sen yläreuna hol-
vin tuentapisteen kohdalla siirry liikkuvasta kuormasta vaakasuunnassa enempää
kuin $0,003 \cdot (H_k + h)$ tai enintään 20 mm. Siirtymiä laskettaessa holvin vaakavoimia es-
tävää vaikutusta ei oteta huomioon.

4.4.4 Perustamistavat

Teräsputkien eri olosuhteissa tyypillisten perustamistapojen ohjeelliset mallikuvat on
esitetty liitteessä 2.

Siltapaikan sijaitessa kantavalla maaperällä putki perustetaan kaivannon pohjalle
rakennettavan tiivistetyn alustäytön varaan (perustamistavat A ja B).

Routivalle pohjamaalle rakennettava putki perustetaan tiivistetylle alustäytölle rou-
timattomaan perustamissyvyyteen ulottuvan routimattoman massanvaihdon varaan
tai putki on routasuojattava (perustamistapa C). Routasuojauksen on täytettävä oh-
jeessa *Sillan geotekninen suunnittelu* /35/ esitetyt vaatimukset.

Mikäli maaperä on huonosti kantavaa, mutta edellytykset putkisillan rakentamiseksi
maanvaraisena täyttyvät, voidaan alustäytön alla käyttää lavarakennetta, jotta täyttö
voidaan tiivistää pehmeällä ja häiriintymisherkällä pohjamaalla. Lavan rakenteesta
tehdään yksityiskohtaiset geotekniset ja rakennepiirustukset. Lava voidaan tehdä
myös teräksisenä poimulevyrakenteena tai lujiterakenteena, jotka on suunniteltava
tapauskohtaisesti (perustamistapa D).

Jos sillan peruskaivanto tehdään tuetussa kaivannossa, tehdään kaivanto-suunni-
telma joko osana rakennussuunnitelmaa tai rakennustyöhön liittyvänä työsuunnitel-
mana. Kaivantosuunnitelmassa esitetään tuennan geotekninen ja rakennetekninen
mitoitus ja rakenteet sekä pohjaveden hallinta yksityiskohtaisesti työvaiheittain (pe-
rustamistapa E).

4.5 Siirtymäkiila

Siirtymäkiila tehdään putken yhteyteen väylän alusrakenteen routivuus- ja kanta-
vuuserojen tasaamiseksi sekä niistä aiheutuvien epätasaisten routimismousujen ja
painumien aiheuttamien haittojen pienentämiseksi. Kevyen liikenteen väylillä siirty-
mäkiilojen tarve harkitaan siltakohtaisesti. Siirtymäkiilat suunnitellaan ohjeen Tiera-
kenteen suunnittelu kohdan 3.5 mukaisesti /29/.

Rautatiesillan siirtymäkiilat suunnitellaan noudattaen InfraRYL:n /12/ määräyksiä ja
ohjeita.

4.6 Verhoukset ja eroosiosuojaus

Jos virtaavan veden, aallokon, jään tai muun kuluttavan voiman aiheuttama eroosio
on voimakasta, putken päätyyn on tehtävä eroosiosuojaus ohjeen *Sillan geotekninen
suunnittelu* /35/ mukaisesti.

Pengerluiskiin tehdään samanlainen verhous kuin väylän muillakin osilla, yleensä nurmi- tai turveverhous. Putken päädyt on verhottava kestävämmiin, jolloin on käytettävä kovia verhousmateriaaleja. Verhouksen suunnittelussa voidaan käyttää apuna verhousten rakentamista käsitteleviä SILKO-ohjeita /21/.

4.7 Tukimuurit

Tukimuuria käytetään putken päädyssä silloin, kun pääty joudutaan tekemään kaltevuudeltaan jyrkemmäksi kuin 1:1. Pienehköissä kohteissa voidaan tulla toimeen palkkiverhouksella (kerroskivirakenne) tai louhelaatikolla. Vaativimmissa kohteissa tukimuuri tehdään teräsbetonista tai kivikoreista siltakohtaisen suunnitelman mukaisesti.

4.8 Kuivatus

Alikulkukäytävien yhteydessä on suunniteltava pintavesien poisjohtaminen pintavesikouruilla tai -putkilla tai tarvittaessa kokonaisvaltaisella sadevesijärjestelmällä. Alikulkukäytävien yhteydessä tulee putkisiltoihin aina suunnitella myös vajovesisuojaus vesien pois ohjaamiseksi. Vesistösiltoilla vajovesisuojausta ei tarvita.

4.9 Valaistuslaitteet ja kiinnikkeet

Alikulkukäytäviin joudutaan usein kiinnittämään valaisimia ja kaapelikiskoja. Valaisimien tulee olla iskunkestävää tyyppiä. Valaistus toteutetaan tilaajalla hyväksytetävän valaistussuunnitelman mukaisesti.

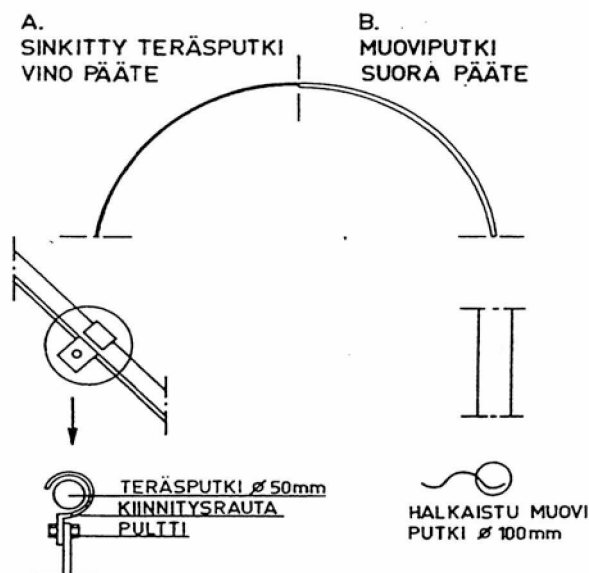
Vetotanko on suunniteltava vesistösiltoihin, joista tulee päästä läpi veneellä ja jotka ovat niin pieniä, että vene on vedettävä putken läpi. Vetotanko auttaa myös sillantarkastajaa ja lisää tarkastustyön turvallisuutta. Vetotanko asennetaan putken molemmille sivuille, käyttötarkoitusta ajatellen sopivalle korkeudelle HW-pinnan yläpuolelle. Vetotanko tehdään sinkitystä vesijohtoputkesta, joka kiinnitetään putkisillan toimitajan asentamiin kiinnityspultteihin.

4.10 Tarkkailutapit

Teräsputkisiltaan asennetaan kolme tarkkailutappia suuntakulman oikeellisuuden mittausta ja myöhempiä muodonmittauksia varten. Tarkkailutapit ovat kuumasinkittyjä pultteja M10x20, jotka kiinnitetään putken keskilinjalle putken lakeen porattuun reikään Ø 12 mm siten, että pultin kanta on putken sisäpuolella aallon harjalla ja mutteri putken päällä aallon pohjassa. Putken pituussuunnassa tarkkailutapit sijoitetaan putken kumpaakin päätä ja lakipituuden keskikohtaa lähinnä olevan yläpuolisen aallon pohjaan.

4.11 Alikulkukäytävän päädyn suojaus

Alikulkukäytävän päädyn suojaus on tarpeellinen varsinkin pienissä putkissa. Suojaus voidaan tehdä esimerkiksi kuvassa 4.6 esitetyllä tavalla tai tarkoitukseen erityisesti kehitetyillä kumiprofiileilla.



Kuva 4.6 Alikulkukäytävän päädyn suojaus

4.12 Kaiteet

Ohjeita kaiteiden tekemisestä, laatuvaatimuksista ja pituuksista on esitetty ohjeissa *Tien poikkileikkauksen suunnittelu* /31/, *Tiekaiteiden suunnittelu* /32/, *Siltojen kaiteet* /20/, ratateknisten ohjeiden (RATO) osassa 8 /33/ sekä InfraRYL:n kohdissa 32100 ja 42451.

4.13 Aukko tien keski- tai välialueella

Jos putkisillassa on lyhyt aukko tien keski- tai välialueella, aukon reunat on suojattava tien pituussuuntaisilla betoni- tai teräspalkeilla. Palkkien välinen aukko saa olla enintään 0,6 m. Palkkien on kestettävä lyhytaikainen onnettomuustilannetta kuvaava pystysuora pistekuorma 30 kN. Kuorman voi olettaa jakaantuvan tasan kahdelle palkille. Suistuneen auton on päästävä vapaasti liukumaan palkkien päällä.

Jalankulkijoiden putoaminen estetään tarvittaessa aukon päälle laitettavalla teräsverkolla, jonka silmän pinta-ala on enintään 100 cm².

Edellä mainittuja aukkoja ei sallita rautatiesilloilla.

4.14 Maadoitus

Jos teräksinen putkisilta tehdään sähköradalle tai on oletettavissa, että rata tulevaisuudessa sähköistetään, sillan maadoituksesta on tehtävä erillinen maadoitus suunnitelma.

Ohjeita maadoitus suunnitteluun on esitetty Liikenneviraston ohjeessa Rautatiealueelle tulevien kiinteiden laitteiden ja rakenteiden maadoitus suunnittelu /34/.

4.15 Rakennussuunnitelmassa esitettävät asiat

Teräsputkisillan rakennussuunnitelma on laadittava niin, että niiden perusteella silta voidaan valmistaa ja asentaa siten, että kaikki vaatimukset täyttyvät. Teräsputkisillan rakennussuunnitelmassa on huomioitava *Sillansuunnittelun lähtötiedot* -ohjeessa /37/, *Siltojen suunnitelmat* -ohjeessa /38/, *Siltojen tietomalliohjeessa* /39/, *Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastus* -ohjeessa /40/, hankkeen suunnittelu perusteissa ja tässä ohjeessa kerrotut asiat. Sillan geotekniset piirustukset ja suunnitelmaraportti tehdään ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu* /35/ mukaan. Teräsputkisillan rakennussuunnitelmassa on edellä mainituissa ohjeissa esitettyjen asioiden lisäksi esitettävä ainakin seuraavat asiat:

- ennakkokokohotus tai maininta jos ennakkokokohotus ei ole tarpeen
- alustäytön muotoilu ja taso, josta täyttö ja tiivistys voidaan tehdä tavallisilla menetelmillä
- ympäristäytön peitesyvyyden pienin ja suurin arvo
- ympäristäytön materiaalivaatimukset ja tiiveysvaatimukset
- ohjeistus putkisillalle tehtävistä mittauksista ja niiden toteuttamisesta
- pulttiliitoksissa vaadittu esijännitysvoima
- ajoneuvosiltojen liikenteen luokka
- tien tai radan rakenteet putken kohdalla
- kaiteiden perustaminen
- suunniteltu käyttöikä ja miten se saavutetaan
- putken suuntakulma
- isojen teräsputkisiltojen ja kaksoiskaarien vajovesisuojaus.

Teräspankiskilla rakennussuunnitelma sisältää ainakin seuraavat asiakirjat:

- yleispiirustus
- suunnitelmaselostus
- laatuvaatimukset
- mitoituskalkelmat
- käyttöikäkalkelmat
- perustamistapalausunto
- vesistösilasta aukkolausunto tai vesilupa
- dokumentti suunnittelijan laadunvarmistuksesta tai ulkopuolisesta tarkastuksesta.

Yleispiirustuksessa on esitettävä ainakin seuraavat piirrokset:

- tasokuva
- sivukuva
- leikkauskuva ympäristäytöstä
- kuva kaiteen perustamisesta.

Viiteluettelo

- /1/ Akselimassa tutkimus 1998-1999. Helsinki 2000. Tielaitos, tiestötiedot, Tielaitoksen selvityksiä 6/2000, 275 s. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-614-6, TIEL 3200598.
- /2/ Design of soil steel composite bridges, Lars Pettersson, Håkan Sundqvist. KTH Arkitektur och samhällsbyggnad. ISSN 1103-4289. ISSN/KTH/BKN/R-8-SE. TRITA-BKN. Report 112, 4th Edition 2010.
- /3/ Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat SFS-EN 1991-2. 144 s.
- /4/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, SFS-EN 1993-1-1. 100 s.
- /5/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus, SFS-EN 1993-1-8. 149 s.
- /6/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen, SFS-EN 1993-1-9. 42 s.
- /7/ Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 2: Terässillat, SFS-EN 1993-2 + AC. 103 s.
- /8/ Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt, SFS-EN 1997-1. 148 s.
- /9/ Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2, Liikenneviraston ohjeita 13/2012, ISBN 978-952-255-157-3. 112 s.
- /10/ Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7, Liikenneviraston ohjeita 35/2015, ISBN 978-952-255-364-5. 142 s.
- /11/ Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1, Liikenneviraston ohjeita 20/2011, ISBN 978-952-255-733-9. 114 s.
- /12/ InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 1 Väylät ja alueet. Helsinki. Rakennustieto Oy 2006. ISBN 951-682-801-9.
- /13/ InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 3 Sillat ja rakennustekniset osat. (RT 14-10920). Helsinki. Rakennustieto Oy 2008.
- /14/ InfraRYL 2009. 32100 Kaiteet, johteet ja törmäys-suojat
- /15/ Jatkuvatoimisella kuumaupotusmenetelmällä pinnoitetut ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. SFS-EN 10346. 60 s.
- /16/ Kaiteet ja suistumisonnettomuuksien ehkäisy, TIEH2100014-2

- /17/ Kuumavalssatut rakenneteräkset. Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot. SFS-EN 10025-1.
- /18/ Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. SFS-EN ISO 12944-1...8
- /19/ Orgaanisilla aineilla pinnoitetut (muovipinnoitetut) ohutlevyteräkset. Tekniset toimitusehdot. SFS-EN 10169.
- /20/ Siltojen kaiteet. Helsinki. Tiehallinto 2006. ISBN 951-803-691-8. TIEH 2100046-06.
- /21/ Siltojen korjausohjeet – SILKO. Tiehallinto. TIEH 2230096.
 - SILKO 2.911 Kiviheitokeverhouksen teko
 - SILKO 2.912 Kivilaattaverhouksen teko
 - SILKO 2.913 Betonilaattaverhouksen teko
 - SILKO 2.914 Betonikiviverhouksen teko
 - SILKO 2.918 Kenttäkiviverhouksen teko
 - SILKO 2.919 Kivikorirakenteiden teko
- /22/ Specification for Steel Sheet, Metallic-coated, and Polymer Precoated for Corrugated Steel Pipe ASTM A742M
- /23/ Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki. Tiehallinto 2001. ISBN 951-726-743-6. TIEH 2100002-01.
- /24/ Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 5/2013, ISBN 978-952-255-250-1. 118 s.
- /25/ Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. SFS-EN 1090-2.
- /26/ Teräsputkisillat. Rakentamisen laatuvaatimukset. Helsinki. Tiehallinto 2008. ISBN 978-951-803-939-9. TIEH 2200050-07.
- /27/ Teräsrakenteet. Teräsputkisillan korjaaminen. Helsinki. Tiehallinto 2006. SILKO 2.341. TIEH 2230096–2.341.
- /28/ Teräsrakenteet. Vanhan ja uuden sinkkipinnoitteen maalaus. Helsinki. Tiehallinto 2005. SILKO 2.354. TIEH 2230096–2.354.
- /29/ Tierakenteen suunnittelu. Helsinki. Tiehallinto 2004. ISBN 951-803-402-8. TIEH 2100029-04.
- /30/ Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet. Spesifikaatiot ja testausmenetelmät, SFS-EN ISO 1461. 36 s.
- /31/ Tien poikkileikkauksen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 29/2013, ISBN 978-952-255-335-5. 92 s.
- /32/ Tiekaiteiden suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 27/2013, ISBN 978-952-255-332-4. 44 s.

- /33/ Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RATO), osa 8 Sillat, Ratahallintokeskus (11.9.2002).
- /34/ Rautatiealueelle tulevien kiinteiden laitteiden ja rakenteiden maadoitus suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 13/2010. ISBN 978-952-255-556-4. 68 s.
- /35/ Sillan geotekninen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 11/2012. ISBN 978-952-255-143-6.
- /36/ RIL 173-1997 Teräsrakenteet. Rajatilamitoitusohjeet 1996. Mitoitustaulukot ja käyrästöt. ISBN 951-758-377-X.
- /37/ Sillansuunnittelun lähtötiedot. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki. Tiehallinto 2005. ISBN 951-803-528-8. TIEH 2100031-05.
- /38/ Siltojen suunnitelmat. Helsinki. Tiehallinto 2000. ISBN 951-726-615-4. TIEL 2172067-2000.
- /39/ Siltojen tietomalliohje. 4.4.2011. Liikenneviraston ohjeita 8/2011. ISBN 978-952-255-653-0.
- /40/ Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastus. Sillat ja muut taitorakenteet. 1.4.2011. Liikenneviraston ohjeita 7/2011. ISBN 978-952-255-650-9.

Aallotettujen teräspanutkien perustietoja

Rakenteiden tunnuksat ja poikkileikkaukset

Esimerkkejä halkaisijaltaan yli 2 metrin teräspanutkissa käytettävistä rakenteista kirjaintunnuksineen on esitetty taulukossa A1. Muitakin profiilirakenteita on käytettävissä.

Taulukko 1. Tunnuksia putkirakenteille ja niiden aallotuksille.

Rakenne	Aallotus 1)
A12 Monilevyrakenne	150 x 50 (Gävle)
A2 Monilevyrakenne	200 x 55
A3 Monilevyrakenne	380 x 140 (SuperCor)
A4 Monilevyrakenne	400 x 150 (StrenCor)
C3 Kierresaumattu rakenne	125 x 26, 260 x 20/90
C5 Kierresaumattu rakenne	210 x 50/70
1) Merkinnässä ilmoitetaan profiilin aallon pituus ja aallonkorkeus sekä aallon harjan leveys, jos profiili on tasaharjainen.	

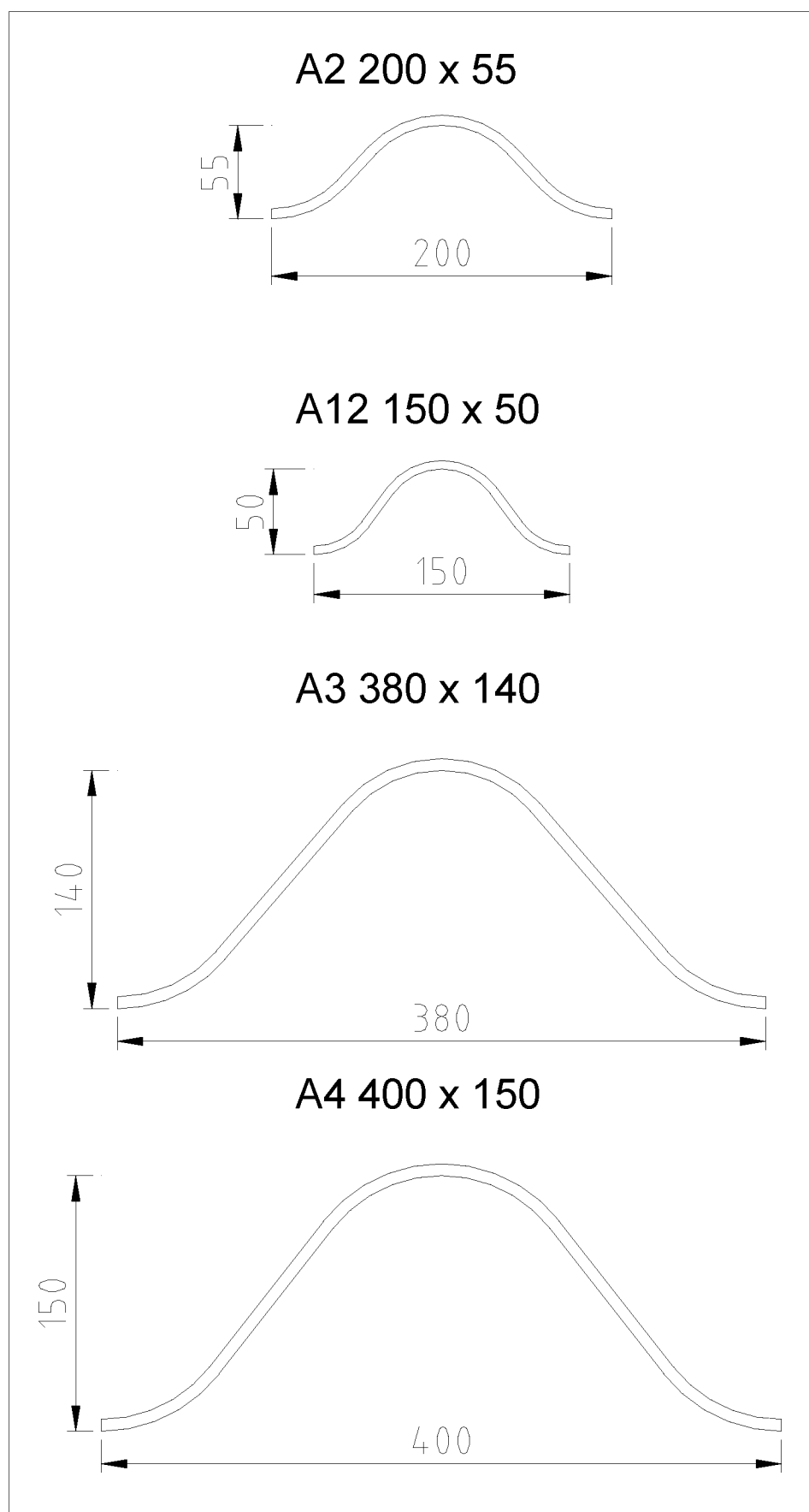
Rakenteiden poikkileikkausarvot ja aallotuksen periaatepiirros on esitetty kohdassa A2. Uusi profiili voidaan sijoittaa luokkiin A tai C taivutusvastuksen perusteella, jolloin taulukon A3 arvoja pidetään luokan alarajana.

Taulukko 2. Profiilin poikkileikkauksen pinta-ala (teoreettinen minimiarvo)

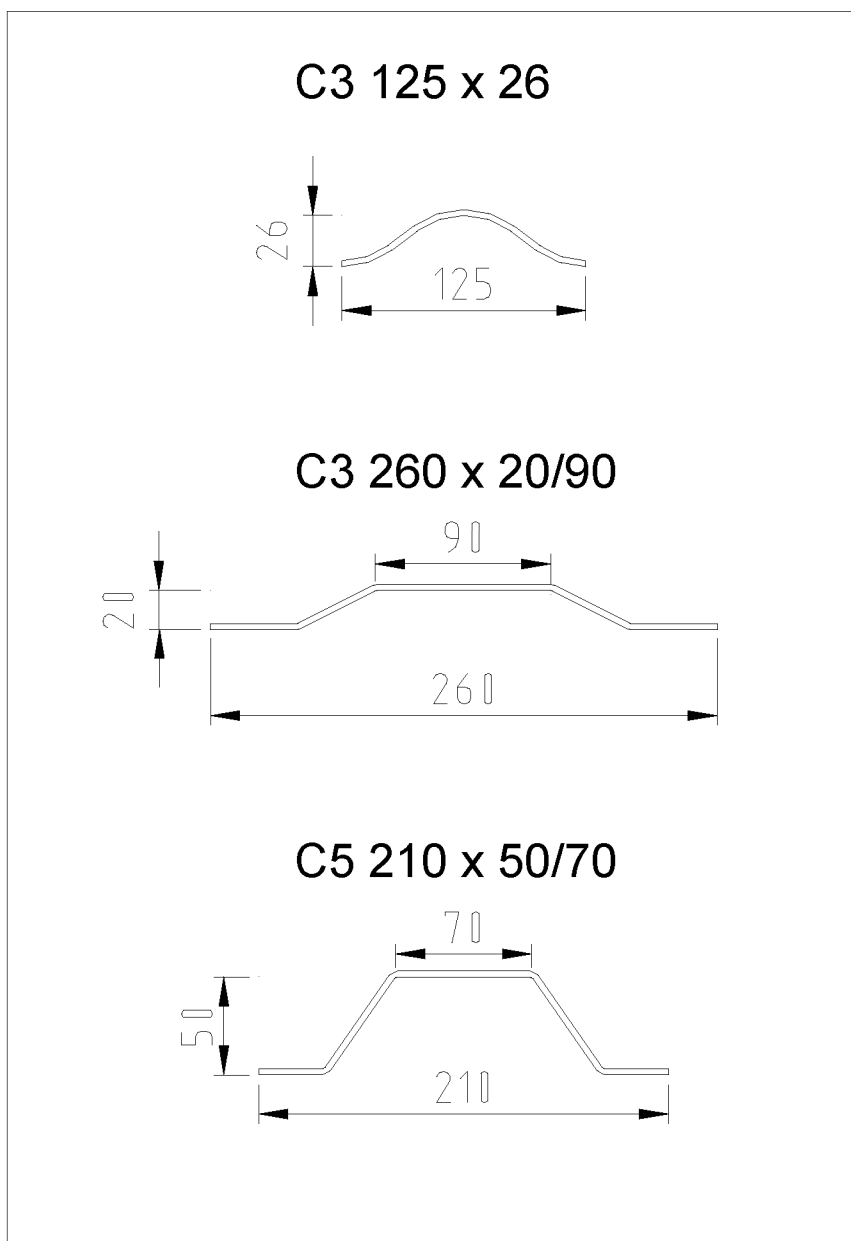
Taulukko 3. Profiilin poikkileikkauksen taivutusvastus (teoreettinen minimiarvo)

Levy- paksuus [mm]	Taivutusvastus [cm^3/m]					
	Rakenne					
	A12	A2	A3	A4	C3	C5
2,5	37,2	39,7	105,1		16,7	48,0
3,0	44,4	46,8	125,9	136,0	19,7	57,0
3,5	51,5	54,0	146,6	160,8	23,0	66,1
4,0	58,6	61,4	167,2	185,5	26,3	75,5
4,5	65,6	68,6	187,6	210,3		
5,0	72,6	75,7	208,0	235,0		
5,5	79,5	82,8	228,3	259,4		
6,0	86,3	89,7	248,5	283,7		
6,5	93,2	96,6	268,6	306,7		
7,0	100,0	103,5	288,7	329,7		

Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti.

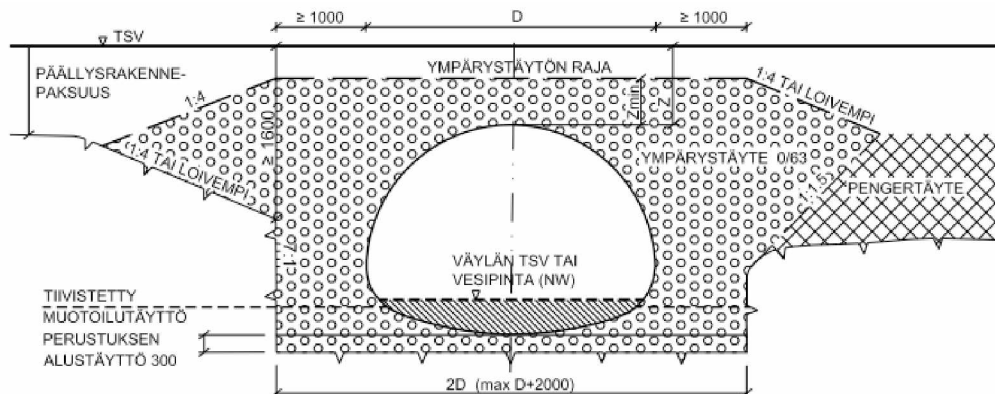


Kuva 1. Monilevyrakenteen aallotuksia (rakennetunnus A).



Kuva 2. Kierresaumatun rakenteen aallotuksia (rakennetunnus C)

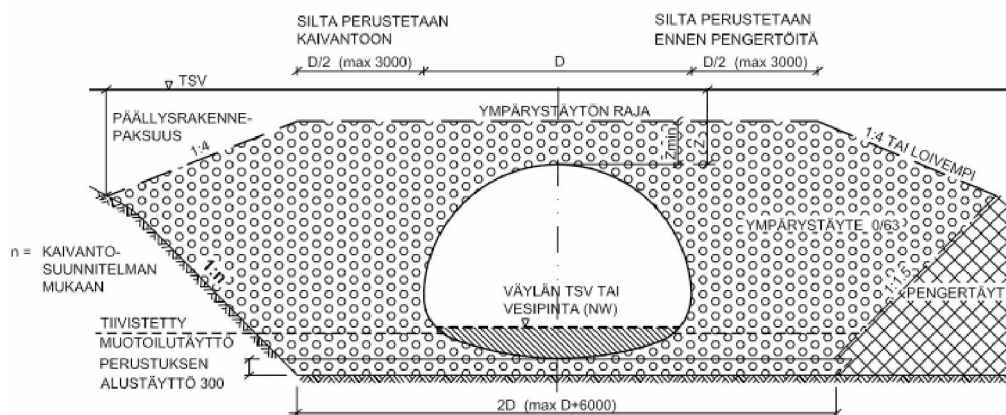
Perustamistapojen ohjeelliset mallikuvat



PERUSTUKSEN TIIVISTETTY ALUSTÄYTÖ ON MUOTOILTAVA VASTAAMAAN PUTKISILLAN POHJAN MUOTOA. MUOTOILLUN TÄYTÖN TULEE ULOTTUA TASOLLE, JONKA YLÄPUOLELLA TÄYTÖÄ JA TIIVISTYSTÄ VOIDAAN TEHDÄ TAVANOMAISILLA MENETELMILLÄ. MUOTOILLUN ALUSTÄYTÖN TASO ESITETÄÄN SILLAN YLEISPIIRUSTUKSESSA.

Z_{min} = MINIMIPEITESYVYYS = 500 mm

Kuva 1. Perustamistapa A. Putken perustaminen kalliolle.

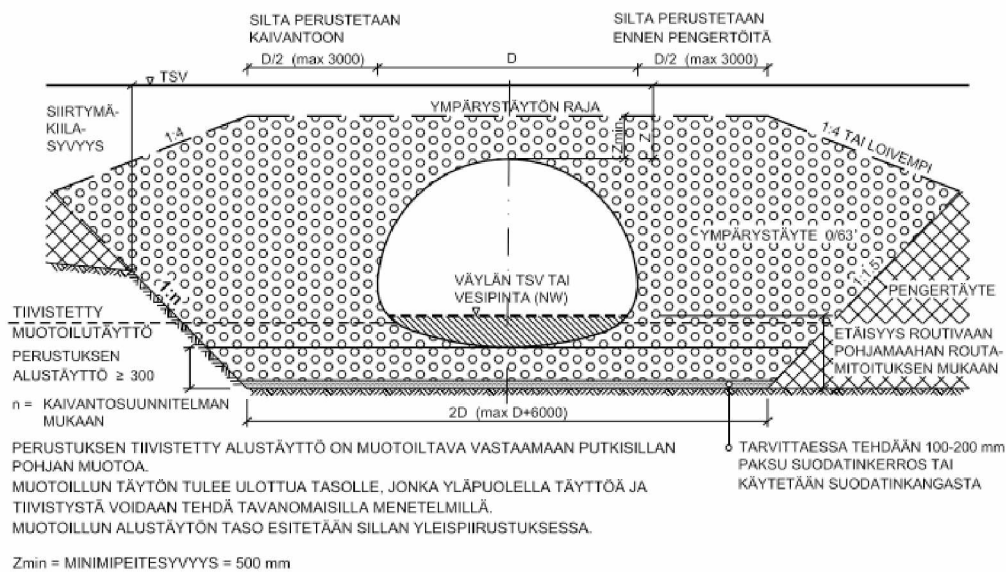


PERUSTUKSEN TIIVISTETTY ALUSTÄYTÖ ON MUOTOILTAVA VASTAAMAAN PUTKISILLAN POHJAN MUOTOA. MUOTOILLUN TÄYTÖN TULEE ULOTTUA TASOLLE, JONKA YLÄPUOLELLA TÄYTÖÄ JA TIIVISTYSTÄ VOIDAAN TEHDÄ TAVANOMAISILLA MENETELMILLÄ. MUOTOILLUN ALUSTÄYTÖN TASO ESITETÄÄN SILLAN YLEISPIIRUSTUKSESSA.

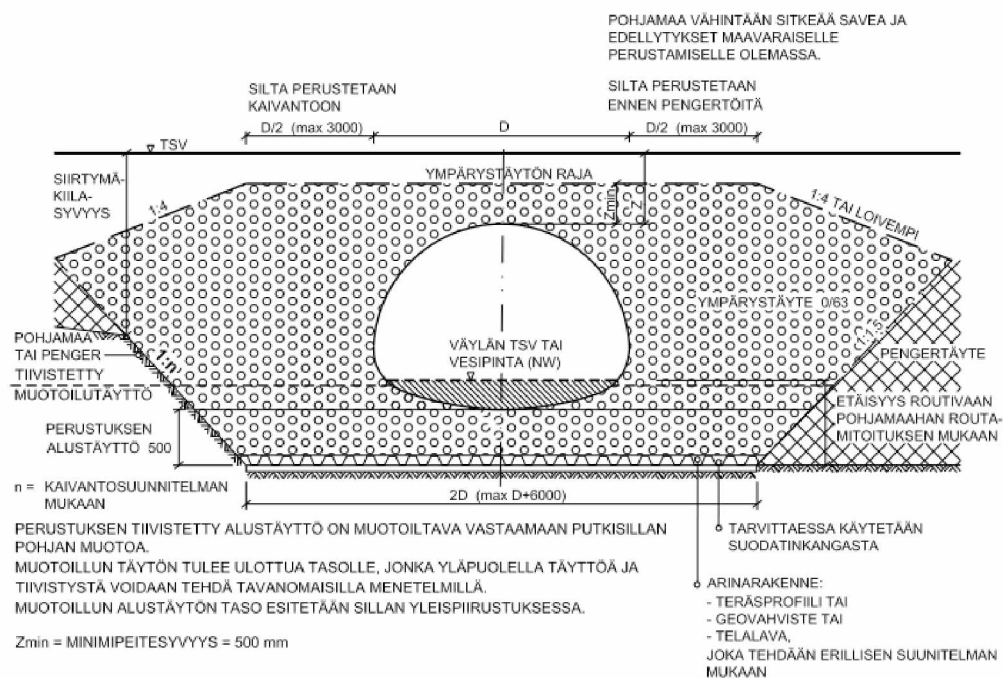
HUOM. JOS POHJAMAAN TÄYTÄÄ PERUSTUKSEN ALUSTÄYTÖÖN ASETETUT VAATIMUKSET, VOIDAAN PUTKI PERUSTAA TIIVISTETYN POHJAMAAN VARAAN.

Z_{min} = MINIMIPEITESYVYYS = 500 mm

Kuva 2. Perustamistapa B. Putken perustaminen routimattoman pohjamaan tai penkereen varaan.



Kuva 3. Perustamistapa C. Putken perustaminen routivalle pohjamaalle.



Kuva 4. Perustamistapa D. Putken perustaminen pehmeikölle.



Kuva 5. Perustamistapa E. Putken perustaminen tuetussa kaivannossa.

Mitoitusesimerkki

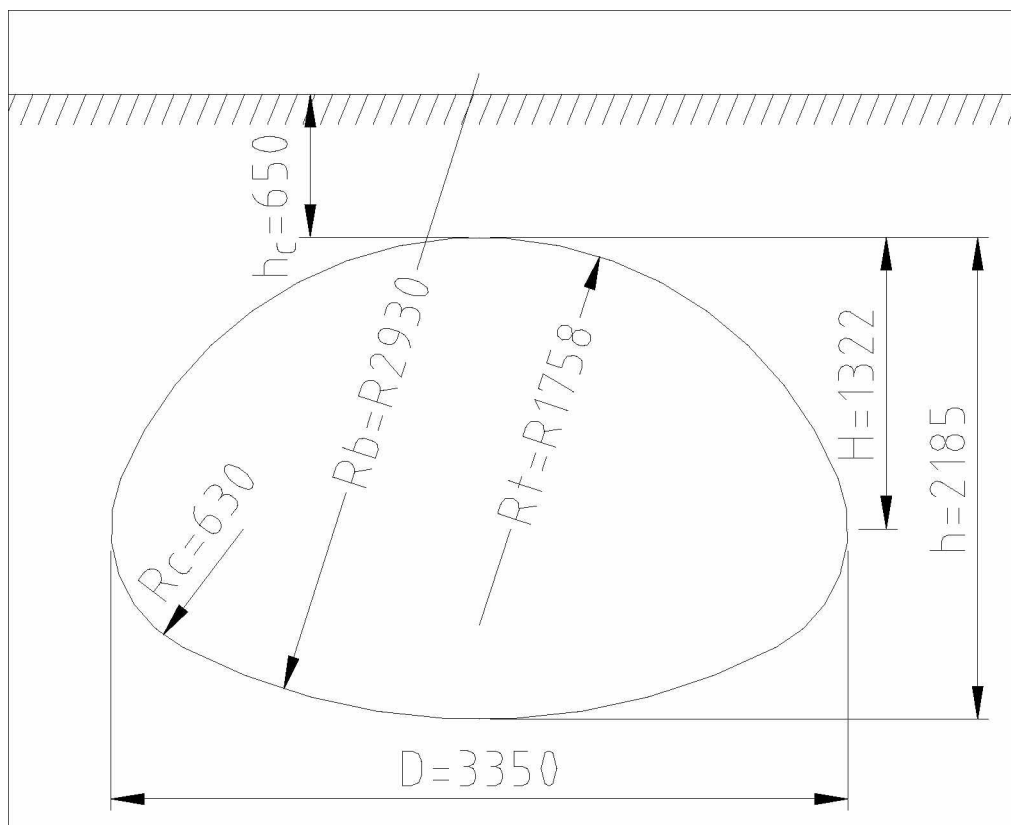
1 Lähtötiedot

Mitoitusesimerkissä on laskettu teräsputken laen kestävyys käyttö-, murto- ja väsytyserätilassa. Lisäksi laskenta on tehty putken laelle tulevan liitoksen kestävyydelle murto- ja väsytyserätilassa. Kuormina on käytetty staattisia kuormakaavioita LM1 ja LM2, sekä väsytyskuormakaaviota FLM4.

Taulukko 1. Mitoitusesimerkin lähtötiedot

Laskennassa tarvittavat lähtötiedot	Tunnus	Esimerkissä
Asennuspaikka (Penger / Kaivanto)		Kaivanto
Ympäristäyttö (Sora / Murske)		Murske
Peittosyvyys	h_c	650 mm
Putken poikkileikkaus (Ympyrä / Muu)		Muu
Putken leveys	D	3350 mm
Putken katon korkeus	H	1322 mm
Putken yläosan säde	R_t	1790 mm
Putken sivun säde	R_c	630 mm
Putken alaosan säde	R_b	2970 mm
Levyypaksuus	t_y	4 mm
Taivutusvastus	W_y	61,5 mm ³ /mm
Hitausmomentti	I_y	1813,8 mm ⁴ /mm
Poikkipinta-ala	A_y	4,74 mm ² /mm
Teräksen myötölujuus	f_y	235 MPa
Teräksen murtolujuus	f_u	360 MPa
Teräksen kimmomoduli	E_s	210 GPa

Taulukon 1 ja kuvan 1 mitat ovat putken sisämittoja.



Kuva 1. Lähtötiedot

2 Osavarmuuskertoimet ja kuormat

Kuormakertoimet

Pysyvät, käyttörajatila:	$\gamma_{gk} := 1.0$
Pysyvät, murtorajatila max:	$\gamma_{gd.max} := 1.15$
Pysyvät, murtorajatila min:	$\gamma_{gd.min} := 0.9$
Liikennekuorma, käyttörajatila:	$\gamma_{pk} := 1.0$
Liikennekuorma, murtorajatila:	$\gamma_{pd} := 1.35$
Väsytyksrajatilan kuormat:	$\gamma_{Ff} := 1.0$

Liikennekuormien sovituskertoimet

Sovituskerroin, pienille putkille (LM1 ja LM2):	$\alpha_q = 0.87$
---	-------------------

Materiaalikertoimet

Murtorajatila

Teräs:	$\gamma_{M0} := 1.0$
Liitokset, kestävyys:	$\gamma_{M2} := 1.25$
Liitokset, esijännitys:	$\gamma_{M7} := 1.1$
Liitokset, liukuma:	$\gamma_{M3} := 1.25$

Väsytyksrajatila

Teräs:	$\gamma_{Mf} = 1.05$
Liitokset, kestävyys:	$\gamma_{M2.f} = 1.05$
Liitokset, esijännitys:	$\gamma_{M7.f} := 1.0$
Liitokset, liukuma:	$\gamma_{M3.f} := 1.0$

Geotekniset varmuuskertoimet

Geotekninen varmuus:	$\gamma_{n.geo} := 1.0$
Kitkakulman varmuus	$\gamma_{m.\varphi} := 1.0$
Tangenttimoduulin varmuus:	$\gamma_{m.E} := 1.0$
Ympäristäytön tilavuuspaino:	$\gamma_{m.surr} := 1.0$
Yläpuolisentäytön tilavuuspaino:	$\gamma_{m.cover} := 1.0$

Liikennekuormat

LM1

$P_{traffic}$	$164 \frac{kN}{m}$
Pinta-ala kuorma:	$9.0 \frac{kN}{m^2}$

LM2

$P_{traffic}$	$189 \frac{kN}{m}$
---------------	--------------------

3 Voimasuureet

3.1 Tehollinen peitesyvyys

$$E_{jd} := \frac{E_j}{\gamma_{n.geo} \cdot \gamma_{m.E}} \quad E_{jd} = 48.6 \cdot \text{MPa}$$

$$\lambda_f := \frac{E_{jd} \cdot D^3}{E_s \cdot I_y} \quad \lambda_f = 4795.7$$

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} := 0.013 \cdot \frac{\gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D^2}{E_j} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{2.8} \cdot \lambda_f^{0.56-0.2 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right)} \quad \delta_{hj\ddot{a}ssa} = 2.6 \cdot \text{mm}$$

$$h_{c.red} := h_c - \delta_{hj\ddot{a}ssa} \quad h_{c.red} = 647 \cdot \text{mm}$$

3.2 Normaalivoimat

Normaalivoima maan painosta

$$\phi_{kd} := \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi_k)}{\gamma_{n.geo} \cdot \gamma_{m.\phi}} \right) \quad \phi_{kd} = 45 \cdot \text{deg}$$

$$S_v := \frac{0.8 \cdot \tan(\phi_{kd})}{\left(\sqrt{1 + \tan(\phi_{kd})^2} + 0.45 \cdot \tan(\phi_{kd}) \right)^2} \quad S_v = 0.23$$

$$\kappa := 2 \cdot S_v \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \quad \kappa = 0.089$$

$$S_{ar.kaivanto} := \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa} \quad S_{ar.kaivanto} = 0.957$$

$$S_{ar} := \text{if}(\text{Asennus} = 2, 1, S_{ar.kaivanto}) \quad S_{ar} = 0.957$$

$$D_d := \text{if}(D > 1.05 \cdot 2 \cdot R_s, 2 \cdot R_s, D) \quad D_d = 3.35 \text{m}$$

$$N_j := 0.2 \cdot \frac{H}{D_d} \cdot \gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D_d^2 \dots$$

$$+ S_{ar} \cdot \left(0.9 \cdot \frac{h_{c.red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \gamma_{m.cover} \cdot \rho_{cover} \cdot D^2$$

$$N_j = 49.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Normaalivoima liikennekuormasta

$$N_t(p_{\text{traf}}, q_1) := \begin{cases} p_{\text{traf}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } \left(\frac{h_{c,\text{red}}}{D}\right) \leq 0.25 \\ \left(1.25 - \frac{h_{c,\text{red}}}{D}\right) \cdot p_{\text{traf}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c,\text{red}}}{D}\right) \leq 0.75 \\ 0.5 \cdot p_{\text{traf}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c,\text{red}}}{D} \end{cases}$$

Mitoittava normaalivoima

Käyttörajatila:

$$N_k(p_{\text{traf}}, q_1) := \gamma_{gk} \cdot N_{j,KRT} + N_{t,KRT}(p_{\text{traf}}, q_1)$$

$$LM1 \quad N_{k,1} := N_k(\alpha_q p_{\text{traff}c_1}, \alpha_q q_1) \quad N_{k,1} = 204 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad N_{k,2} := N_k(\alpha_q p_{\text{traff}c_2}, \alpha_q q_2) \quad N_{k,2} = 213 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Murtorajatila:

$$N_d(p_{\text{traf}}, q_1) := \gamma_{gd,\text{max}} \cdot N_j + \gamma_{pd} \cdot N_t(p_{\text{traf}}, q_1)$$

$$LM1 \quad N_{d,1} := N_d(\alpha_q p_{\text{traff}c_1}, \alpha_q q_1) \quad N_{d,1} = 266 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad N_{d,2} := N_d(\alpha_q p_{\text{traff}c_2}, \alpha_q q_2) \quad N_{d,2} = 278 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Väsytyksrajatila:

Väsytystarkasteluita varten lasketaan kuormakaavion LM2 mukainen putken normaalivoima.

$$\Delta N_{d,f}(p_{\text{traf}}, q_1) := \gamma_{Ff} \cdot N_{t,KRT}(p_{\text{traf}}, q_1)$$

$$N_{LM2} := \Delta N_{d,f}(p_{\text{traff}c_2}, q_2) \quad N_{LM2} = 189 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3.3 Taivutusmomenttien määrittäminen

Taivutusmomentti maanpainosta

Apusuureet:

$$f_1 := \begin{cases} 0.67 + 0.87 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.2\right) & \text{if } 0.2 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.35 \\ 0.8 + 1.33 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.35\right) & \text{if } 0.35 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.5 \\ 2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right) & \text{if } 0.5 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.6 \end{cases} \quad f_1 = 0.859$$

$$f_{2.surr} := \begin{cases} 0.0046 - 0.0010 \cdot \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \\ 0.0009 & \text{if } \lambda_f > 5000 \end{cases} \quad f_{2.surr} = 9.192 \times 10^{-4}$$

$$f_{2.cover} := \begin{cases} 0.018 - 0.004 \cdot \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \\ 0.0032 & \text{if } \lambda_f > 5000 \end{cases} \quad f_{2.cover} = 3.277 \times 10^{-3}$$

$$f_3 := 6.67 \cdot \frac{H}{D} - 1.33 \quad f_3 = 1.302$$

Momentti tilanteessa jossa täyttötöy on putken laen tasolla

$$M_{j.alku} := \gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D^3 \cdot (-f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2.surr}) \quad M_{j.alku} = -0.812 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Momentti lopputilanteessa

$$M_j := \gamma_{m.surr} \cdot \rho_1 \cdot D^3 \cdot \left[-f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2.surr} \dots \right. \\ \left. + S_{ar} \cdot \frac{\gamma_{m.cover} \cdot \rho_{cover}}{\gamma_{m.surr} \cdot \rho_1} \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \cdot \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} \cdot f_1 \cdot f_{2.cover} \right] \\ M_j = -0.401 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Taivutusmomentti liikennekuormasta

Apusuureet: $\frac{h_{c.red}}{D} = 0.193$

$$f_{4i} := 0.65 \left(1 - 0.2 \cdot \log(\lambda_f) \right) \quad f_{4i} = 0.171$$

$$f_{4ii} := \begin{cases} 0.120 \left(1 - 0.15 \cdot \log(\lambda_f) \right) & \text{if } \lambda_f \leq 50000 \\ \text{"lambda liian suuri"} & \text{if } \lambda_f > 50000 \end{cases} \quad f_{4ii} = 0.054$$

$$f_{4iii} := 4 \cdot 0.01 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right) + 0.4 \quad f_{4iii} = 2.043$$

$$f_{4iv} := \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.25} \quad f_{4iv} = 1$$

$$M_t(p_{traf}, q_1) := f_{4i} \cdot f_{4ii} \cdot f_{4iii} \cdot f_{4iv} \cdot D \cdot p_{traf} + S_{ar} \cdot \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} \cdot f_1 \cdot f_{2.cover} \cdot q_1 \cdot D^2$$

Mitoittava taivutusmomentti putken laella

Tutkittavat tapaukset:

1. Täyttötöön aikainen suurin taivutusmomentti
2. Ympärystytön ja putken päällä olevan ajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti
3. Ympärystytön ja putken sivulla olevan ajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti

Käyttörajaatila

1. Työnaikainen tilanne:

$$M_{k.työ} := M_{j.alku} \quad M_{k.työ} = -0.812 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

2. Maksimi:

$$LM1 \quad M_{k.max.1} := M_{k.max}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{k.max.1} = 8.8 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{k.max.2} := M_{k.max}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{k.max.2} = 9.9 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

3. Minimi

$$LM1 \quad M_{k.min.1} := M_{k.min}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{k.min.1} = -5 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{k.min.2} := M_{k.min}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{k.min.2} = -5.6 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoittava kuorma

$$LM1 \quad M_{k.1} := M(M_{k.työ}, M_{k.max.1}, M_{k.min.1}) \quad M_{k.1} = 8.79 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{k.2} := M(M_{k.työ}, M_{k.max.2}, M_{k.min.2}) \quad M_{k.2} = 9.93 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Murtorajaatila

1. Työnaikainen tilanne:

$$M_{d.työ} := \gamma_{gd.max} \cdot M_{j.alku} \quad M_{d.työ} = -0.934 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

2. Maksimi:

$$LM1 \quad M_{d.max.1} := M_{d.max}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{d.max.1} = 12 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{d.max.2} := M_{d.max}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{d.max.2} = 13.6 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

3. Minimi

$$LM1 \quad M_{d.min.1} := M_{d.min}(\alpha_q p_{traffic_1}, \alpha_q q_1) \quad M_{d.min.1} = -6.7 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{d.min.2} := M_{d.min}(\alpha_q p_{traffic_2}, \alpha_q q_2) \quad M_{d.min.2} = -7.4 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Mitoittava kuorma

$$LM1 \quad M_{d.1} := M(M_{d.työ}, M_{d.max.1}, M_{d.min.1}) \quad M_{d.1} = 12.05 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$LM2 \quad M_{d.2} := M(M_{d.työ}, M_{d.max.2}, M_{d.min.2}) \quad M_{d.2} = 13.59 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Väsytyksrajaatila

Väsytystarkasteluita varten lasketaan kuormakaavion LM2 mukainen putken laen taivutusmomentti.

$$M_{LM2} := \Delta M_{d.f}(p_{traffic_2}) \quad M_{LM2} = 11.55 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

4 Mitoitus

4.1 Pienimmät sallitut mitat

Peitesyvyys

$$h_{c.red} \geq 0.5m$$

$$h_{c.red} = 0.647m$$

Mitoitusehto1A = "OK"

Putken poikkileikkaus

$$D \geq 2.0m$$

Mitoitusehto1B = "OK"

$$100 \leq \lambda_f \leq 50000$$

Mitoitusehto1C = "OK"

Täytöt

$$a_1 > 0.2m$$

$$a_1 = 1.675m$$

Mitoitusehto1D = "OK"

$$a_2 \geq 0.3m$$

$$a_2 = 0.3m$$

Mitoitusehto1E = "OK"

$$a_3 \geq \min\left(3.0m, \frac{D}{2}\right)$$

$$\min\left(3.0m, \frac{D}{2}\right) = 1.675m$$

Mitoitusehto1F = "OK"

4.2 Sallittu liikennekuormien aiheuttama taivutus

Aallotetun teräsputken voimasuureet voidaan laskea ruotsalaisen mitoitusmallin mukaan, jos ehto $f_{4i} \cdot f_{4iii} < 1.0$ täyttyy.

$$f_{4i} \cdot f_{4iii} = 0.35$$

Mitoitusehto1G = "OK"

4.3 Putkisillan mitoitus käyttörajatilassa

$$f_{yk} = 235 \text{ MPa}$$

$$\sigma(N_{d,s}, M_{d,s}) := \frac{N_{d,s}}{A_y} + \frac{|M_{d,s}|}{W_y}$$

Mitoitusehto

$$\sigma_{krt}(N_{d,s}, M_{d,s}) := \frac{\sigma(N_{d,s}, M_{d,s})}{f_{yk}}$$

Putken laella

$$LM1 \quad KA1_1 := \sigma_{krt}(N_{k,1}, M_{k,1}) \quad KA1_1 = 79. \%$$

$$LM2 \quad KA1_2 := \sigma_{krt}(N_{k,2}, M_{k,2}) \quad KA1_2 = 88. \%$$

Mitoitusehto1 = "OK"

4.4 Putkisillan mitoitus murtorajatilassa / putken yläosa

4.4.1 Yhdistetyt rasitukset

Kun tutkitaan normaalivoiman ja momentin yhdistelmää

$$\xi_{NM} := 1.0$$

$$\kappa_2 := \frac{h_{c,red}}{R_t}$$

$$\kappa_2 = 0.362$$

$$\eta_j := 1 - \left(\frac{1}{1 + \kappa_2} \right)^2$$

$$\eta_j = 0.461$$

$$\mu := \left[1.22 + 1.95 \cdot \left(\frac{E_s \cdot I_y}{\eta_j \cdot E_{jd} \cdot R_t^3} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}}$$

$$\mu = 4.134$$

$$N_{cr,el,NM} := \frac{3\xi_{NM}}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot E_s \cdot I_y}{R_t}}$$

$$N_{cr,el,NM} = 2333.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_u := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \cdot A_y$$

$$N_u = 1113.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Nurjahduskuorma

$$N_{cr,NM} := \begin{cases} N_{cr,el,NM} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el,NM}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ N_u \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el,NM}} \right) & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el,NM}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$N_{cr,NM} = 981 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\omega_{NM} := \begin{cases} \frac{N_{cr.NM}}{N_u} & \text{if } \left(\frac{N_{cr.el.NM}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr.el.NM}} & \text{if } \left(\frac{N_{cr.el.NM}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$\eta := \frac{W_{y.pl}}{W_y} \quad \eta = 1.354$$

$$\alpha_{c.NM} := \begin{cases} \eta^2 \cdot \omega_{NM} & \text{if } \left(\eta^2 \cdot \omega_{NM} \right) \geq 0.8 \\ 0.8 & \text{if } \left(\eta^2 \cdot \omega_{NM} \right) < 0.8 \end{cases}$$

Tarkastus yhdistetyille rasiuksille

$$B_2(N_{d.u}, M_{d.u}) := \left(\frac{N_{d.u}}{N_{cr.NM}} \right)^{\alpha_{c.NM}} + \frac{|M_{d.u}|}{M_{y.Rk}}$$

Putken laella

$$LM1 \quad KA2_1 := B_2(N_{d.1}, M_{d.1}) \quad KA2_1 = 74. \%$$

$$LM2 \quad KA2_2 := B_2(N_{d.2}, M_{d.2}) \quad KA2_2 = 82. \%$$

Mitoitusehto2 = "OK"

4.4.2 Normaalivoima

Apusuureet:

$$\text{Kun tutkitaan normaalivoimaa} \quad \kappa_2 = 0.362$$

$$\xi_N := \begin{cases} \sqrt{\kappa_2} & \text{if } \sqrt{\kappa_2} \leq 1.0 \\ 1 & \text{if } \sqrt{\kappa_2} > 1.0 \end{cases} \quad \xi_N = 0.601$$

$$\eta_j = 0.461$$

$$\mu = 4.134$$

$$N_{cr.el} := \frac{3\xi_N}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot E_s \cdot I_y}{R_t}} \quad N_{cr.el} = 1403 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$N_u = 1113.9 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$N_{cr} := \begin{cases} N_{cr,el} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ N_u \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el}} \right) & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases} \quad \begin{aligned} \frac{N_{cr,el}}{N_u} &= 1.26 \\ N_{cr} &= 893 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned}$$

$$\omega := \begin{cases} \frac{N_{cr}}{N_u} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el}} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases} \quad \omega = 0.802$$

$$\eta = 1.354$$

$$\alpha_c := \begin{cases} \eta^2 \cdot \omega & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega) \geq 0.8 \\ 0.8 & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega) < 0.8 \end{cases} \quad \begin{aligned} \eta^2 \cdot \omega &= 1.471 \\ \alpha_c &= 1.471 \end{aligned}$$

$$M_u := \eta \cdot W_y \cdot f_{yk} \quad M_u = 19.6 \text{ kN}$$

Tarkastus normaalivoimalle

$$B_N(N_{d,u}) := \left(\frac{N_{d,u}}{\omega \cdot f_{yk} \cdot A_y} \right)^{\alpha_c}$$

$$LM1 \quad KA3_1 := B_N(N_{d,1}) \quad KA3_1 = 17\%$$

$$LM2 \quad KA3_2 := B_N(N_{d,2}) \quad KA3_2 = 18\%$$

Mitoitusehto3 = "OK"

4.5 Putkisillan mitoitus murtorajatilassa / putken alaosa

$$\xi_a := 1 \quad \mu_a := 1.22$$

$$N_{cr,el,a} := \frac{3\xi_a}{\mu_a} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot E_s \cdot I_a}{R_b}} \quad N_{cr,el,a} = 6138 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{u,a} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \cdot A_a \quad N_{u,a} = 1114 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{cr,a} := \begin{cases} N_{cr,el,a} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} \right) \leq 0.5 \\ N_{u,a} \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_{u,a}}{N_{cr,el,a}} \right) & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} \right) > 0.5 \end{cases} \quad N_{cr,a} = 1063 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tarkistus normaalivoimalle

$$B_{N_A}(N_{d.u}) := \frac{N_{d.u}}{N_{cr.a}}$$

$$LM1 \quad KA4_1 := B_{N_A}(N_{d.1})$$

$$KA4_1 = 25\%$$

$$LM2 \quad KA4_2 := B_{N_A}(N_{d.2})$$

$$KA4_2 = 26\%$$

Mitoitusehto4 = "OK"

4.6 Pulttiliitoksen mitoitus murtorajatilassa

Pultit M20 Lujuus 8.8

$$d_b := 20\text{mm}$$

Pultin murtolujuus:

$$f_{ub} := 800\text{MPa}$$

Pultin reiän halkaisija

$$d_0 := 24\text{mm}$$

Pulttien lukumäärä (kpl/m):

$$n_b = 10 \frac{1}{\text{m}}$$

Pultin tehokas poikkileikkausala:

$$A_{eff} := 0.78 \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2}{4}$$

$$A_{eff} = 245 \cdot \text{mm}^2$$

Pultin tehokas halkaisija:

$$d_{eff} := \sqrt{\frac{4A_{eff}}{\pi}}$$

$$d_{eff} = 18 \cdot \text{mm}$$

Pultin kannan halkaisija:

$$D_b := 34\text{mm}$$

Pultin esijännitysvoima:

$$F_{b.pre} := 97\text{kN}$$

Levyjen välinen kitkakerroin (väsytyks):

$$\mu_f := 0.4$$

Pulttien reunaetäisyys:

$$e_1 = 35 \cdot \text{mm}$$

Pulttien etäisyys aallon suunnassa:

$$p_2 = 50 \cdot \text{mm}$$

Kauemman pultin etäisyys profiilin reunasta:

$$a := e_1 + p_2$$

$$a = 85 \cdot \text{mm}$$

Pultin kestävyys

Kertoimet

$$\alpha_v := 0.6$$

$$k_2 := 0.9$$

Pultin vetolujuuden laskenta-arvo:

$$f_{rtd} := \frac{f_{ub}}{\gamma M2} \quad f_{rtd} = 640 \cdot \text{MPa}$$

Pultin leikkauslujuuden laskenta-arvo:

$$f_{rvd} := \alpha_v \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma M2} \quad f_{rvd} = 384 \cdot \text{MPa}$$

Pultin leikkausvoimakestävyys

Oletetaan, että levyjen liitoskohdassa yksi (1) pultti ei toimi leikkaukselle, eikä reunapuristuskestävyydelle. Vähennetään laskennassa metrin matkalta yksi (1) pultti.

$$F_{Rv} := \left(n_b - 1 \cdot \frac{1}{m} \right) f_{rvd} A_{eff} \quad F_{Rv} = 847 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoitusehto

$$T_b(N_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{F_{Rv}}$$

$$LM1 \quad KA5_1 := T_b(N_{d,1}) \quad KA5_1 = 31 \cdot \%$$

$$LM2 \quad KA5_2 := T_b(N_{d,2}) \quad KA5_2 = 33 \cdot \%$$

Mitoitusehto5 = "OK"

Pultin varren suuntainen vetovoimakestävyys

Pulteista 50 % on vedolla.

Pultin murtuminen

$$F_{Rt1} := (0.5 \cdot n_b) \cdot k_2 \cdot f_{rtd} \cdot A_{eff} \quad F_{Rt1} = 706 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pultin kannan läpileikkautuminen

$$F_{Rp} := 0.6 \left(0.5 \cdot n_b \right) \cdot \frac{f_u}{\gamma M2} \cdot t_y \cdot \pi \cdot D_b \quad F_{Rp} = 369 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Määrittävämpi edellisistä

$$F_{Rt} := \min(F_{Rt1}, F_{Rp}) \quad F_{Rt} = 369 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoitusehto

$$F_b(M_{d,u}) := \frac{|M_{d,u}|}{a} \cdot \frac{1}{F_{Rt}}$$

Putken laella:

$$LM1 \quad KA6_1 := F_b(M_{d,1}) \quad KA6_1 = 38 \cdot \%$$

$$LM2 \quad KA6_2 := F_b(M_{d,2}) \quad KA6_2 = 43 \cdot \%$$

Mitoitusehto6 = "OK"

Pultin yhdistetty veto- ja leikkausvoimakestävyys

Mitoitusehto

$$NM_b(N_{d,u}, M_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{F_{Rv}} + \frac{|M_{d,u}|}{1.4 \cdot a} \cdot \frac{1}{F_{Rt1}}$$

Putken laella:

$$\begin{array}{ll} LM1 & KA7_1 := NM_b(N_{d,1}, M_{d,1}) \quad KA7_1 = 46\% \\ LM2 & KA7_2 := NM_b(N_{d,2}, M_{d,2}) \quad KA7_2 = 49\% \end{array}$$

Mitoitusehto7 = "OK"

Reunapuristus- ja reunarepeytymiskestävyys

$$\alpha_b := \min\left(\frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0\right) \quad \alpha_b = 1$$

$$k_1 := \min\left(2.8 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) \quad k_1 = 2.5$$

Pulttien reiät ylittävät standardissa SFS-EN 1993-1-8 esitetyn mitan. Tällöin reunapuristuksen kestävyys tehdään 20 % vähennys.

$$F_{Rh1} := 0.8 \left(n_b - 1 \cdot \frac{1}{m} \right) \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d_{eff} \cdot t_y}{\gamma_{M2}} \quad F_{Rh1} = 366 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$F_{Rh} := \begin{cases} F_{Rh1} & \text{if } \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} > 1.25 \\ \frac{F_{Rv}}{1.25} & \text{if } \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} \leq 1.25 \end{cases} \quad \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} = 2.31$$

$$F_{Rh} = 366 \cdot \frac{kN}{m}$$

Mitoitusehto

$$\Sigma_b(N_{d,u}) := \frac{N_{d,u}}{F_{Rh}}$$

$$\begin{array}{ll} LM1 & KA8_1 := \Sigma_b(N_{d,1}) \quad KA8_1 = 73\% \\ LM2 & KA8_2 := \Sigma_b(N_{d,2}) \quad KA8_2 = 76\% \end{array}$$

Mitoitusehto8 = "OK"

4.7 Putkisillan väsytyksimitoitus

Teräsputkisilltojen väsytyksimitoitus tehdään tavallisesti kuormakaaviolla FLM4. Tässä esimerkissä on väsytykskestävyys tarkastettu käyttämällä suunnitteluohjeen mukaista laskentamenetelmää, joka perustuu kuormakaavioon FLM4.

4.7.1 Profiilin väsytyksimitoitus

Liikenteentyppi: Keskipitkä liikenne

Raskaan liikenteen määrä / kaista (n_1): 500000

Suunniteltukäyttöikä := 50

Liikenteen kokonaismäärä:

$$N_{\Sigma} := \text{Suunniteltukäyttöikä} \cdot n_1 \qquad N_{\Sigma} = 2.5 \times 10^7$$

Väsymisluokka := 160

Väsymislujuuden referenssiarvo, kun kuormituskertoja 2 milj.

$$\Delta\sigma_c = 152.29 \text{ MPa}$$

Vakioamplitudinen väsymisraja

$$\Delta\sigma_D := 0.737 \cdot \Delta\sigma_c = 112.238 \text{ MPa}$$

Liikennekuorman aiheuttama taivutusmomentin vaihteluväli putken laella:

$$M_{\text{fat.1}} := M_{\text{LM2}} \qquad M_{\text{fat.1}} = 11.6 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{fat.2}} := -1 \cdot \left(\frac{D - 2m}{12m} \right) \cdot M_{\text{LM2}} \qquad M_{\text{fat.2}} = -1.3 \cdot \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Jännitysvaihteluväli laen yläpinnassa:

$$\sigma_{\text{max.y.p.}} := -\frac{N_{\text{LM2}}}{A_y} - \frac{M_{\text{fat.1}}}{W_y} \qquad \sigma_{\text{max.y.p.}} = -228 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{min.y.p.}} := -\frac{N_{\text{LM2}}}{A_y} - \frac{M_{\text{fat.2}}}{W_y} \qquad \sigma_{\text{min.y.p.}} = -19 \text{ MPa}$$

Puristetusta alueesta huomioidaan 60 % (SFS-EN 1993-1-9)

$$\Delta\sigma_{\text{R.y.p.}} := 0.6 \left| \sigma_{\text{max.y.p.}} - \sigma_{\text{min.y.p.}} \right| \qquad \Delta\sigma_{\text{R.y.p.}} = 125 \text{ MPa}$$

Suurin jännitysvaihteluväli putken laen yläpinnassa saadaan kun huomioidaan maksimijännityksen ero lepotilaan.

Puristetusta alueesta huomioidaan 60 % (SFS-EN 1993-1-9)

$$\Delta\sigma_{\text{R.y.p.}} := 0.6 \left| \sigma_{\text{max.y.p.}} \right| \qquad \Delta\sigma_{\text{R.y.p.}} = 137 \text{ MPa}$$

Jännitysvaihteluväli laen alapinnassa:

$$\sigma_{\max.ap} := -\frac{N_{LM2}}{A_y} + \frac{M_{fat.1}}{W_y} \quad \sigma_{\max.ap} = 148 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min.ap} := -\frac{N_{LM2}}{A_y} + \frac{M_{fat.2}}{W_y} \quad \sigma_{\min.ap} = -61 \text{ MPa}$$

Puristetusta alueesta huomioidaan 60 % (SFS-EN 1993-1-9)

$$\Delta\sigma_{R.ap} := |\sigma_{\max.ap} - 0.6\sigma_{\min.ap}| \quad \Delta\sigma_{R.ap} = 185 \text{ MPa}$$

Suurin jännitysvaihteluväli putken laen alapinnassa saadaan em tapauksesta. Maksimijännityksen ero jännityksen nolatilasta on pienempi.

$$\text{Suurin jännitysvaihteluväli } \Delta\sigma_R := \Delta\sigma_{R.ap} = 184.6 \text{ MPa}$$

Kertoimet:

Liikenteen tyyppi ja peitesyvyys

$$\lambda_n = 5.4 \times 10^{-3}$$

Suurten ja pienten jännitysten redusointi

$$\lambda_\sigma = 0.471$$

Mitoitusehdot :

$$KA9 := \lambda_n \cdot \lambda_\sigma \frac{\Delta\sigma_{R.y.p}^5}{\Delta\sigma_D^5} \cdot \frac{N_\Sigma}{5 \cdot 10^6} \quad KA9 = 3 \%$$

Mitoitusehto9 = "OK"

4.7.2 Liitosten väsytsmitoitut

Pultin leikkausvoimakestävyys

Väsymisluokka1 := 100

Väsymislujouden referenssiarvo, kun kuormituskertoja 2 milj.

$$\Delta\tau_{c.b} = 100 \text{ MPa}$$

$$\Delta\tau_{c.b.d} := \frac{\Delta\tau_{c.b}}{\gamma_{Mf}} \quad \Delta\tau_{c.b.d} = 95 \text{ MPa}$$

Pultin leikkausjännityksen vaihteluväli:

$$\Delta\tau_{R.b} := \frac{N_{LM2}}{\left(n_b - 1 \cdot \frac{1}{m}\right) \cdot A_{eff}}$$

Kertoimet

Liikenteen tyyppi ja peitesyvyys

$$\lambda_n = 5.4 \times 10^{-3}$$

Suurten ja pienten jännitysten redusointi

$$\lambda_{\tau.b} = 0$$

Mitoitusehto

$$KA10 := \lambda_n \cdot \lambda_{\tau.b} \frac{\Delta\tau_{R.b}^5}{\Delta\tau_{c.b.d}^5} \cdot \frac{N_\Sigma}{2 \cdot 10^6} \quad KA10 = 0. \%$$

Mitoitusehto10 = "OK"

Pultin varren suuntainen vetovoimakestävyys

Väsymisluokka2 := 80

Väsymislujouden referenssiarvo, kun kuormituskertoja 2 milj.

$$\Delta\sigma_{c.b} = 80 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta\sigma_{c.b.d} := \frac{\Delta\sigma_{c.b}}{\gamma_{M2.f}} \quad \Delta\sigma_{c.b.d} = 76 \cdot \text{MPa}$$

$$\Delta\sigma_{D.b} := 0.737 \Delta\sigma_{c.b.d}$$

Ekvivalentti vakioamplitudinen vaihteluväli

Putken laella:

$$\Delta\sigma_{R.b} := \frac{M_{LM2}}{a} \cdot \frac{1}{0.5 \cdot n_b \cdot A_{eff}}$$

Kertoimet

Liikenteen tyyppi ja peitesyvyys

$$\lambda_n = 5.4 \times 10^{-3}$$

Suurten ja pienten jännitysten redusointi

$$\lambda_{\sigma.b} = 0.812$$

Mitoitusehdot

$$KA11 := \lambda_n \cdot \lambda_{\sigma.b} \frac{\Delta\sigma_{R.b}^5}{\Delta\sigma_{D.b}^5} \cdot \frac{N_\Sigma}{5 \cdot 10^6} \quad KA11 = 66. \%$$

Mitoitusehto11 = "OK"

Pultin yhdistetty leikkaus ja vetovoimakestävyys

$$KA12 := KA10 + KA11 \quad KA12 = 66. \%$$

Mitoitusehto12 = "OK"

